

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Marko Špoljar**

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Ana Pilipović, dipl. ing.

Student:

Marko Špoljar

Zagreb, 2016.

*Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.*

*Zahvaljujem se svojoj mentorici doc. dr. sc. Ani Pilipović na stručnim savjetima, profesionalnom odnosu te pomoći tijekom izrade diplomskog rada.*

*Zahvalio bih se i g. Mladenu Putancu iz tvrtke MAC Motoplastika bez čije pomoći, savjeta i materijala ne bi bilo moguće izraditi eksperimentalni dio rada.*

*Želio bih se zahvaliti i dr. sc. Petru Ilinčiću, višem asistentu na Katedri za motore i vozila za savjete vezane uz automobilsku industriju.*

*Također, želio bih se zahvaliti i Mihi Klaiću na Katedri za alatne strojeve za rezanje ispitnih tijela te prof. dr. sc. Željku Alaru i Romanu Divjaku na ispitivanju žilavosti ispitnih tijela.*

*Želio bih se zahvaliti i Siniši Mirkoviću na pomoći i savjetima za ispitivanje rasteznih svojstava.*

*Također bih želio zahvaliti svojim roditeljima i svojoj curi Ivi Biondić na potpori i pomoći tijekom studiranja.*

Marko Špoljar



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: Marko Špoljar

Mat. br.: 0035178802

Naslov rada na hrvatskom jeziku: Ispitivanje kompozitnih tvorevina za primjenu u automobilskoj industriji

Naslov rada na engleskom jeziku: Testing of composite product for application in automotive industry

Opis zadatka:

Polimerni kompoziti u industriji se primjenjuju više od pedeset godina. Prva primjena zabilježena je u maloj brodogradnji, a kasnije se proširila na ostala transportna sredstva i ostale industrijske primjene. Mnogobrojna odlična svojstva ovih materijala, niski troškovi te jednostavnost proizvodnje uvjetovali su veliko širenje područja njihove primjene. Kompozitni materijali su kombinacija dva ili više materijala različitih svojstava koji daju materijal takvih svojstava kakva ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe. Uz razvoj novih materijala razvili su se i novi postupci prerade.

Jedan od velikih potrošača polimernih kompozita je automobilska industrija jer polimerni kompoziti imaju malu masu uz dobra mehanička svojstva što utječe na bolju iskoristivost goriva i postojanost na koroziju. Zahtjevi koje polimerni kompoziti za primjenu u automobilima moraju ispunjavati uključuju trajnost, apsorpciju energije (prilikom sudara), smanjenje buke i vibracija te krutost. Polimerni kompoziti ojačani vlaknima zadovoljavaju sve te kriterije. Međutim, danas uspješna primjena polimernih kompozita u automobilima više ovisi o brzini i niskim troškovima proizvodnje i materijala nego o svojstvima proizvoda u primjeni.

U radu je potrebno načiniti pregled polimernih kompozita koji se upotrebljavaju za izradu dijelova u automobilskoj industriji, postupke izrade, zahtjeve koji se postavljaju na materijale te nove trendove na tom području. U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je s odabranim postupkom prerade izraditi i ispitati mehanička svojstva kompozitnih tvorevina s različitim materijalima i međusobno usporediti dobivene rezultate s naglaskom na moguću primjenu u automobilskoj industriji.

Zadatak zadan:

5. svibnja 2016.

Rok predaje rada:

7. srpnja 2016.

Predviđeni datum obrane:

13., 14. i 15. srpnja 2016.

Zadatak zadao:

Ana Pilipović  
Doc. dr. sc. Ana Pilipović

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Franjo Cajner

# Sadržaj

POPIS SLIKA .....	I
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA S MJERNIM JEDINICAMA.....	IV
POPIS KRATICA .....	VII
SAŽETAK .....	VIII
SUMMARY .....	IX
1. UVOD .....	1
2. POLIMERNI KOMPOZITI .....	2
2.1 Ojačavala .....	3
2.1.1 Vlaknima ojačani polimerni kompoziti.....	3
2.1.2 Kompoziti ojačani česticama .....	11
2.2 Polimerne matrice .....	12
2.2.1 Plastomerne matrice.....	12
2.2.2 Duromerne matrice.....	12
2.2.3 Elastomerne matrice.....	13
2.3 Vrste polimernih kompozita .....	14
2.3.1 Poliamid ojačan staklenim i ugljikovim vlaknima .....	14
2.3.2 Polipropilen ojačan staklenim i prirodnim vlaknima .....	15
2.3.3 Polikarbonat ojačan ugljikovim i aramidnim vlaknima.....	16
2.3.4 Poli(fenilen-oksidi) ojačan staklenim vlaknima .....	16
2.3.5 Poli(fenilen-sulfid) ojačan staklenim vlaknima .....	17
2.3.6 Poli(eter-eter-keton) ojačan ugljikovim i staklenim vlaknima .....	17
2.3.7 Poli(etilen-tereftalat) ojačan staklenim vlaknima.....	17
2.3.8 Polistiren ojačan prirodnim vlaknima .....	18
2.3.9 Poli(eter-imid) ojačan staklenim vlaknima .....	18
2.3.10. Poliesterske i epoksidne smole ojačane ugljikovim, aramidnim i prirodnim vlaknima .....	18
2.3.11 Poliuretanske i vinil-esterske smole ojačane staklenim i ugljikovim vlaknima .....	19
2.3.12 Prirodni i sintetski kaučuk ojačan poliamidom, vlaknima aramida i metalnom žicom .....	19
3. PROIZVODNJA POLIMERNIH KOMPOZITA.....	20
3.1 Pultrudiranje .....	20
3.2 Dodirni postupak štrcanjem.....	21

3.3 Namotavanje filamenata .....	23
3.4 Ručni postupak laminiranja .....	24
3.5 Podtlačno ulijevanje .....	25
3.6 RTM postupak.....	26
3.7 Izravno prešanje.....	27
3.8 Proizvodnja pneumatika .....	27
4. PRIMJENA POLIMERNIH KOMPOZITA .....	29
4.1 Karoserija .....	29
4.2 Eksterijer .....	31
4.3 Interijer .....	33
4.4 Ovjes.....	36
4.5 Ispod poklopca motora.....	38
5. POSTOJEĆI ZAHTJEVI ZA MATERIJALE I NOVI TRENDVI.....	40
6. EKSPERIMENTALNI RAD .....	41
6.1 Uvod.....	41
6.2 Odabir tkanja i rasporeda vlakana.....	43
6.3 Definiranje parametara proizvodnje i mehaničkih ispitivanja .....	44
7. PROIZVODNJA POLIMERNOG KOMPOZITA PODTLAČNIM OBLIKOVANJEM.....	55
7.1 Priprema proizvodnje .....	55
7.2 Izrada kompozitne ploče .....	59
8. REZULTATI ISPITIVANJA MEHANIČKIH SVOJSTAVA .....	66
8.1 Ispitivanje žilavosti .....	66
8.2 Ispitivanje savojnih svojstava .....	66
8.3 Ispitivanje rasteznih svojstava.....	68
9. RASPRAVA REZULTATA .....	71
10. ZAKLJUČAK.....	73
11. LITERATURA .....	74
12. PRILOZI.....	82

## POPIS SLIKA

Slika 2.1. Sastav kompozita.....	2
Slika 2.2. Mogućnosti odabira vlakana .....	4
Slika 2.3. "S" staklena vlakna u obliku tkanine .....	5
Slika 2.4. Staklena vlakna u obliku mata .....	5
Slika 2.5. Ugljikova vlakna .....	6
Slika 2.6. Dijagram rasteznih svojstava vlakana (1 ugljikova vlakna, 2 aramidna vlakna, 3 para-aramidna vlakna, 4 staklena vlakna, poli(eter-imid) (PEI), 6 poli(etilen-tereftalat) (PET), 7 celuloza, 8 poliamid (PA)) .....	7
Slika 2.7. Aramidna vlakna .....	8
Slika 2.8. Vlakna kuraue .....	8
Slika 2.9. Vlakna lana .....	9
Slika 2.10. Konopljina vlakna.....	10
Slika 2.11. Drvno brašno .....	11
Slika 2.12. <i>Hevea Brasiliensis</i> , prirodni kaučuk .....	13
Slika 2.13. Poliamid ojačan staklenim vlaknima, korito za rezervni kotač, <i>Audi A8</i> .....	14
Slika 2.14. Zupčanik od poliamida ojačanog ugljikovim vlaknima, <i>BMW X5</i> .....	15
Slika 2.15. Polipropilen ojačan lanenim vlaknima .....	16
Slika 2.16. PET ojačan staklenim vlaknima .....	18
Slika 3.1. Pultrudiranje.....	21
Slika 3.2. Dodirni postupak štrcanjem .....	22
Slika 3.3 Pištolj za dodirni postupak štrcanjem.....	23
Slika 3.4. Namotavanje filamenata .....	23
Slika 3.5. Vratilo izrađeno postupkom namotavanjem filamenata.....	24
Slika 3.6. Ručno laminiranje .....	24
Slika 3.7. Podtlačno oblikovanje .....	25
Slika 3.8. RTM postupak .....	27
Slika 3.9. Kalup i stroj za vulkanizaciju za završnu fazu proizvodnje pneumatika .....	28
Slika 4.1. Anatomija automobila podijeljena na sekcije .....	29
Slika 4.2. Karoserija <i>Lexusa LFA</i> .....	30

Slika 4.3. Karoserija <i>Audi R8</i> .....	31
Slika 4.4 <i>Corvette Stingray</i> .....	32
Slika 4.5. <i>Fordov</i> poklopac motora ojačan ugljikovim vlaknima .....	32
Slika 4.6. Modul vrata za <i>Chrysler Jeep Liberty</i> .....	34
Slika 4.7. Panel vrata izrađen od matrice ojačane ugljikovim vlaknima .....	34
Slika 4.8. Komandna ploča <i>SLS AMG-a</i> .....	35
Slika 4.9. Sjedala iz <i>Opel Insignije OPC</i> .....	36
Slika 4.10. Lisnata Opruga proizvedena RTM postupkom.....	37
Slika 4.11. Naplatak od epoksidne smole ojačane ugljikovim vlaknima.....	38
Slika 4.12. Poklopac glave motora kod 3,2 FSI motora .....	38
Slika 4.13. Čep od polipropilena ojačanog konoljinim vlaknima.....	39
Slika 6.1. Dijelovi odbojnika .....	42
Slika 6.2. Vrste tkanja ojačavala .....	43
Slika 6.3. Ispitna tijela za ispitivanje žilavosti .....	44
Slika 6.4. Ispitna tijela za ispitivanje rasteznih svojstava .....	44
Slika 6.5. Ispitna tijela za ispitivanje savojnih svojstava .....	45
Slika 6.6. <i>Charpyev</i> bat <i>AVK Budapest UT300</i> .....	47
Slika 6.7. Orijentacija ispitnog tijela .....	47
Slika 6.8. Kidalica <i>Shimadzu AG-IC 300 kN</i> za ispitivanje rasteznih svojstava .....	49
Slika 6.9. Prikaz ispitnog tijela s ekstenziometrom u steznoj čeljusti .....	50
Slika 6.10. Prikaz postava oslonaca i opterećenja kod savojnog ispitivanja .....	51
Slika 6.11. Ispitivanje savojnih svojstava na kidalici .....	51
Slika 6.12. <i>Shimadzu AGS-X</i> za ispitivanje savojnih svojstava .....	52
Slika 7.1. Krojenje aramidnih vlakana.....	55
Slika 7.2. Čišćenje površine kalupa acetonom .....	56
Slika 7.3. Vosak tvrtke <i>Rexco</i> upotrebljavan za pripremu površine kalupa.....	57
Slika 7.4. Miješanje epoksidne smole i umreživala .....	58
Slika 7.5. Postupak premazivanja ugljikovih vlakana epoksidnom smolom .....	59
Slika 7.6. Postupak premazivanja aramidnih vlakana epoksidnom smolom .....	60
Slika 7.7. Postupak premazivanja zadnjih slojeva ugljikovih vlakana epoksidnom smolom .....	60
Slika 7.8. Postavljanje tkanine za odjeljivanje.....	61
Slika 7.9. Postavljanje tkanine za upijanje viška smole i ventila .....	62



Slika 7.10. Hermetički zatvoren kalup pomoću folije od poliamida.....	63
Slika 7.11. Podtlačna pumpa sa zaštitnim spremnikom.....	64
Slika 7.12. Gotova kompozitna ploča .....	65
Slika 7.13. Izrezana ispitna tijela za određivanje mehaničkih svojstava .....	65
Slika 8.1. Dijagram sila – pomak kod ispitivanja savojnih svojstava .....	67
Slika 8.2. Dijagram savojnog naprezanja - istezanja .....	67
Slika 8.3. Puknuće ispitnog tijela prilikom savojnog ispitivanja .....	68
Slika 8.4. Dijagram rastezno naprezanje – istezanje .....	69
Slika 8.5. Raslojavanje ispitnog tijela.....	70
Slika 9.1. Profil u obliku šešira za izradu odbojnika ( <i>e. hat profile</i> ).....	71

---

**POPIS TABLICA**

Tablica 2.1. Svojstva vlakana .....	10
Tablica 6.1. Svojstva upotrijebljenih vlakana .....	45
Tablica 6.2. Raspored slaganja vlakana za izradak debljine 3 mm .....	46
Tablica 6.3. Raspored slaganja vlakana za izradak debljine 2 mm .....	46
Tablica 8.1. Rezultati ispitivanja žilavosti .....	66
Tablica 8.2. Rezultati savojnog ispitivanja .....	66
Tablica 8.3. Rezultati rasteznog ispitivanja .....	68
Tablica 9.1. Svojstva čelika legiranog borom .....	71
Tablica 12.1. Podaci o izmjerenim dimenzijama ispitnih tijela za ispitivanje žilavosti ....	83
Tablica 12.2. Podaci o izmjerenim dimenzijama ispitnih tijela za ispitivanje savoynih svojstava .....	84
Tablica 12.3. Podaci o izmjerenim dimenzijama ispitnih tijela za ispitivanje rasteznih svojstava .....	85

---

**POPIS OZNAKA S MJERNIM JEDINICAMA**

Oznaka	Jedinica	Opis
$a_{cU}$	$\text{kJ/m}^2$	savojna žilavost
$b$	mm	širina ispitnog tijela
$D1$	mm	promjer oslonca kod ispitivanja savojnih svojstava
$D2$	mm	promjer oslonca kod ispitivanja savojnih svojstava
$E$	MPa	modul rastezljivosti
$E_c$	J	energija apsorbirana udarcem
$E_f$	Mpa	modul savitljivosti
$F$	N	sila
$F_{\max}$	N	maksimalna sila
$h$	mm	debljina ispitnog tijela
$L$	mm	duljina, razmak oslonaca
$L$	mm	razmak oslonaca
$m$	kg	masa
$P$	kW	snaga
$R_m$	MPa	rastezna čvrstoća
$S$		procijenjeno standardno odstupanje
$s$	mm	progib ispitnog tijela
$v$	m/s	brzina
$\bar{x}$		aritmetička sredina
$\varepsilon$	%	istezanje

---

$\varepsilon_t$	%	svojno istezanje
$\theta$	°C	temperatura
$\sigma$	Mpa	rastezno naprezanje
$\sigma_s$	MPa	svojna čvrstoća

## POPIS KRATICA

BMC – vrsta izravnog prešanja (e. *bulk moulding compound*)

E-vlakna – vrsta staklenih vlakana

FSI – vrsta ubrizgavanja, prema istoizvanom Volkswagenovom motoru

PA – poliamid

PEEK – poli(eter-eter-keton)

PEI – poli(eter-imid)

PET – poli(etilen-tereftalat)

PPD-T – poli(p-fenilen-tereftalamid)

PPO – poli(fenilen-oksidi)

PPS – poli(fenilen-sulfid)

RTM – injekcijsko prešanje (e. *Resin Transfer Moulding*)

S-vlakna – vrsta staklenih vlakana

SMC – vrsta izravnog prešanja (e. *sheet moulding compound*)

UV – e. *ultraviolet* – ultraljubičasto

WPC – drveno-plastični kompoziti (e. *wood-plastic composites*)

**SAŽETAK**

U diplomskom radu su opisana svojstva polimernih kompozita na temelju odabira proizvodnog postupka, materijala matrica i ojačavala s naglaskom na primjenu u automobilske industrije. U eksperimentalnom djelu rada prikazan je proizvodni postupak podtlačnog oblikovanja polimernog kompozita te ispitivanje mehaničkih svojstava dobivenih upotrijebljenim proizvodnim postupkom.

Ključne riječi:

Automobilska industrija, hibridni polimerni kompozit, podtlačno oblikovanje, rastezna svojstva, savojna svojstva, žilavost

## **SUMMARY**

Properties of polymer composites based on manufacturing process, matrix and reinforcement material types used in the automobile industry are provided in this thesis. The vacuum bagging procedure of making polymer composites is also elaborated. At the end of this paper mechanical properties of hybrid composite were done and compared with metal which is used for the same purpose in automobile industry.

### **Key words**

Automobile industry, Charpy impact properties, flexural properties, hybrid polymer composite, tensile properties, vacuum bagging

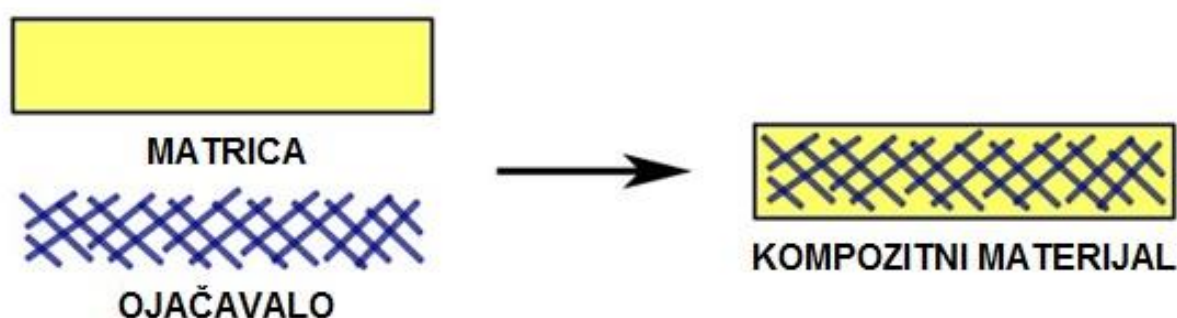
## 1. UVOD

Polimerni kompoziti su najraširenija vrsta kompozita. U ovome diplomskom radu će biti prikazano zašto su kompoziti toliko primjenjivi, te koja je njihova uloga u automobilske industrije. Automobilska industrija je veliki potrošač polimernih kompozita. Posljedica njihove primjene je smanjenje mase što utječe na manju potrošnju goriva, kvalitetu i postojanost na koroziju, što su samo neke od prednosti polimernih kompozita. S obzirom na mnoge prednosti, logično je da zamjenjuju konvencionalne materijale i da sav razvoj kreće u smjeru napretka i poboljšanja svojstava kompozita. Zahvaljujući inovacijama na području razvoja kompozita, automobilska industrija je napredovala od početaka do danas, no ima još mjesta za napredak.



## 2. POLIMERNI KOMPOZITI

Kompoziti su materijali proizvedeni umjetnim spajanjem dvaju ili više materijala različitih svojstava s ciljem postizanja karakteristika kakve ne posjeduje niti jedan materijal [1]. Svi kompoziti sastoje se od matrice i ojačavala, a kod polimernih kompozita je matrica proizvedena od polimernog materijala. Na slici 2.1 prikazan je sastav kompozitnog materijala s označenim fazama.



Slika 2.1. Sastav kompozita [2]

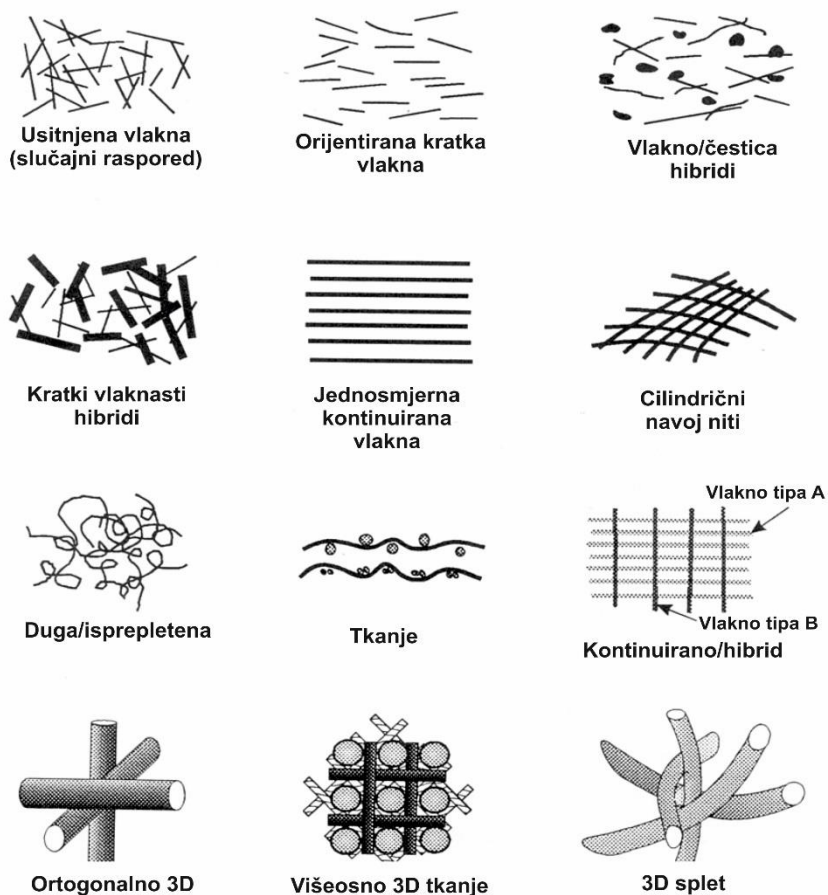
Zadaća ojačavala je da budu nosivi elementi kompozita, stoga moraju osigurati visoku čvrstoću, visoki modul elastičnosti i otpornost na trošenje. Zadaća matrice je da drži ojačavala zajedno, štiti kompozit od raznih agresivnih djelovanja atmosfere što znači da se ojačavala sama po sebi ne mogu primijeniti. Isto tako matrica raspoređuje opterećenje na ojačavalo i daje vanjski izgled tj. oblik kompozita. Poznato je kako svojstva materijala proizlaze iz njihove strukture, samo što kod polimernih kompozita svojstva ovise i o svojstvima matrice i ojačavala, pa će svrsishodno tome pojedina svojstva ovisiti o veličini i raspodjeli sastojaka, dok će neka svojstva ovisiti o volumnom udjelu sastojaka. Važna karakteristika kompozita je također oblik sastojaka te priroda i jakost veze između sastojaka. [1] Pri svakoj vrsti proizvodnje treba razmišljati o obnovljivim resursima, štednji energije, manjem zagađenju okoliša pa tako i kod kompozita. Biokompoziti su kao što i samo ime govori, kompoziti kod kojih je barem jedna komponenta biljnog ili životinjskog podrijetla. Kombinacijom prednosti drva i polimernih materijala dobivaju se drvno-plastični kompoziti (e. *wood-plastic composites*, *WPC*).

## 2.1 Ojačavala

S obzirom na oblik ojačavala postoje vlaknima ojačani kompoziti koji su ujedno i najčešći, kompoziti ojačani česticama, slojeviti kompoziti i sendvič konstrukcije. [3] U automobilske industriji prevladavaju polimerni kompoziti ojačani vlaknima i česticama. Slojeviti kompoziti i sendvič konstrukcije karakteristični su za sportsku primjenu u automobilizmu i ne upotrebljavaju se u toj mjeri kao kompoziti ojačani vlaknima i česticama. Kompozitni materijali mogu biti izotropni, anizotropni i ortotropni. Ako su izotropni tada su mehanička svojstva kompozita jednaka u svim pravcima djelovanja opterećenja, ako su anizotropni mehanička svojstva su različita ovisno o smjeru djelovanja opterećenja. Kod ortotropnih kompozita mehanička svojstva su različita u različitim ortogonalnim smjerovima. [4]

### 2.1.1 Vlaknima ojačani polimerni kompoziti

Postoje vlakna biljnog i sintetičkog porijekla. Češće se upotrebljavaju vlakna sintetičkog porijekla zato što su njihova svojstva bolja, no to ne znači da biljna vlakna ne pronalaze primjenu. Svaka vrsta vlakna pronalazi upotrebu, u suprotnom slučaju bi proizvodi bili predimenzionirani sigurnošću. Prilikom upotrebe čvrstih i krutih vlakana u kombinaciji s mekanijom i duktilnijom matricom dobiva se poboljšana čvrstoća, žilavost, krutost i povećanje omjera čvrstoće i gustoće. Prilikom odabira vlakana potrebno je obratiti pažnju na duljinu vlakna, promjer i orijentaciju vlakana. S obzirom na promjer vlakana razlikujemo viskere, niti i žicu. Viskeri su tanka vlakna ( $0,1\ \mu\text{m}$  –  $5\ \mu\text{m}$ ) u obliku niti, često su kratka zbog lakšeg smještaja unutar matrice što rezultira velikim omjerom duljine i promjera. Posjeduju izvrsna mehanička svojstva zbog pravilne kristalne strukture. Niti su vlaknasta ojačavala promjera većeg od viskera, a manjeg od žice. Izvrsnih su mehaničkih svojstva, ali su izuzetno anizotropna [4]. Ojačavala debljine žice upotrebljavaju se u automobilske pneumatice odnosno pronalaze većinu primjene u automobilske industriji. Vrsta vlakana se odabire ovisno o primjeni i željenim svojstvima kompozita. Na slici 2.2 prikazane su neke od nabrojanih mogućnosti kojima se dobivaju željena svojstva, sukladno orijentaciji i vrsti tkanja vlakana.



Slika 2.2. Mogućnosti odabira vlakana [1]

### 2.1.1.1 Staklena vlakna

Staklena vlakna su umjetna vlakna koja se dobivaju iz rastaljenog stakla izvlačenjem niti i namotavanjem na brzo rotirajući valjak. Lako se prepoznaju po bijeloj ili prozirnoj boji te visokoj čvrstoći, ali niskim modulom elastičnosti. Postoje različite vrste staklenih vlakna ovisno o odabiru stakla koje se upotrebljava kao sirovina. U automobilske industriji upotrebljavaju se "E" i "S" vlakna. "E" vlakna imaju relativno dobru rasteznu čvrstoću i krutost, ali im je udarna žilavost loša [5]. Dodatna prednost "E" vlakna je njihova cijena, postojanost na vlagu i blaže kemikalije. Postojani su pri temperaturama do gotovo 500 °C što je velika prednost [6]. "S" vlakna imaju bolja mehanička svojstva zbog smanjenog promjera. Rastezna čvrstoća i žilavost im je viša nego kod "E" vlakna, ali je zbog samog postupka izrade i boljih svojstava cijena 10 puta veća [7]. "S" staklena vlakna mogu se naći pod nazivom "T" ili "R" ovisno o

proizvođaču. Na slici 2.3 prikazana su "S" vlakna, gdje se vidi finije tkanje vlakana tj. manji promjer vlakana.



**Slika 2.3. "S" staklena vlakna u obliku tkanine [8]**

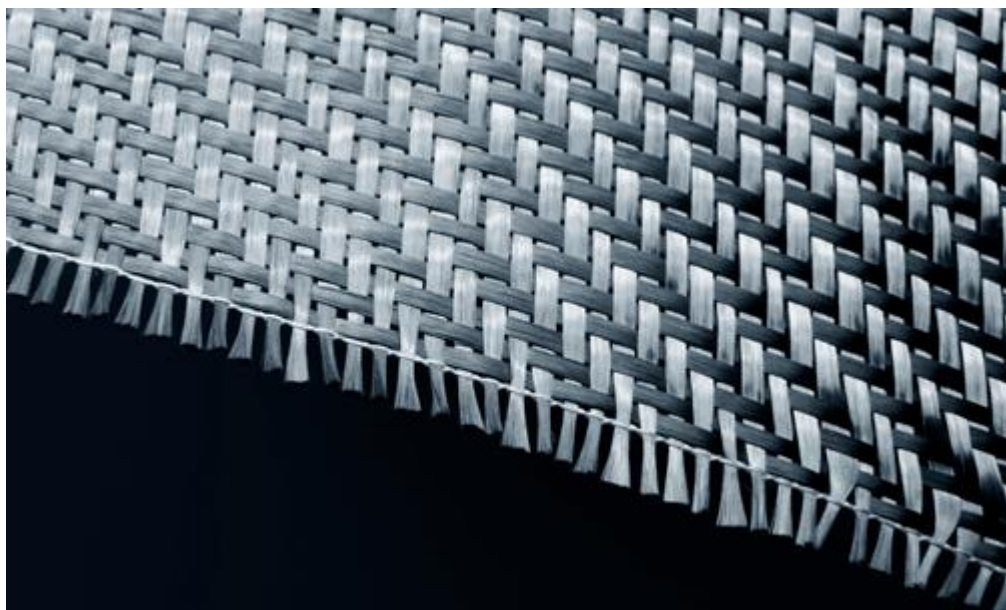
Staklena vlakna mogu se upotrebljavati u obliku rovinga, staklenog mata, roving tkanine te kombinacija navedenih varijanti [9]. Na slici 2.4 prikazana su staklena vlakna u obliku mata u kojem je razmještaj vlakana u različitim smjerovima.



**Slika 2.4. Staklena vlakna u obliku mata [10]**

### 2.1.1.2 Ugljikova vlakna

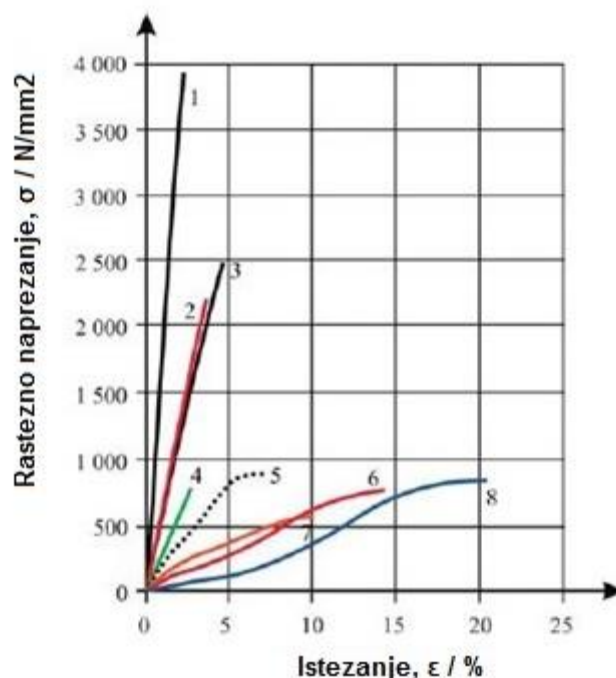
Ugljikova vlakna su vlakna koja sadrže minimalno 90 % ugljika. Dobivaju se od već oblikovanih vlakana, pretežito poliakrilonitrilnih vlakana visoke čvrstoće, a u manjoj mjeri i od celuloznih viskoznih vlakana. Neovisno o vrsti ishodišnog materijala, postupak dobivanja provodi se toplinskom obradom u dva stupnja; predobradba i karbonizacija. Tim postupcima se pod strogo definiranim uvjetima i parametrima obrade iz početnog materijala postupno uklanjaju svi kemijski elementi osim ugljika. Kod proizvodnje grafitnih vlakana u završnoj se obradbi ciklička struktura ugljika grafitiranjem oblikuje u grafitnu te se tako postiže udio ugljika i do 99 % [11]. Ugljikova vlakna imaju najvišu specifičnu krutost i najvišu specifičnu čvrstoću od svih ojačavala u obliku vlakana. I uz povišenu temperaturu osiguravaju visoki modul elastičnosti i visoku čvrstoću. Postojana su na vlagu i niz otapala, kiselina i lužina te uz sva nabrojana svojstva spadaju u *top* inženjerske materijale. Nedostatak ugljikovih vlakana je cijena jer su izuzetno skupa [12]. Na slici 2.5 prikazana su ugljikova vlakna u obliku tkanine.



Slika 2.5. Ugljikova vlakna [12]

### 2.1.1.3 Aramidna vlakna

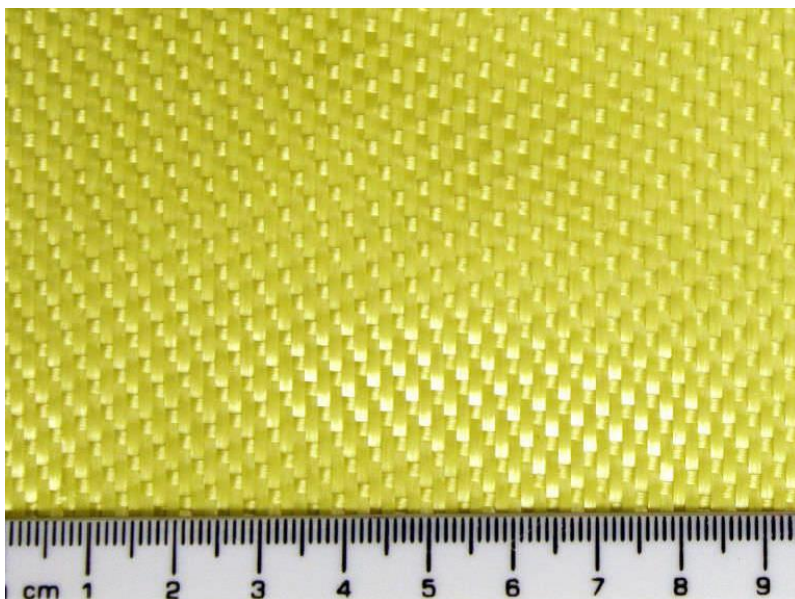
Prva aramidna vlakna proizvedena su 1965. godine pod komercijalnim nazivom *Kevlar*, tvrtke *Du Pont*. Postoje razni tipovi aramidnih vlakana, a svrstani su prema mehaničkim svojstvima (Kevlar 29, 49, 149, gdje brojevi označavaju module elastičnosti u GPa). Aramidna vlakna su sastavljena od sintetskih linearnih makromolekula koje sadrže aromatske skupine povezane amidnim ili imidnim vezama. Osnova aramidnih vlakana je poli(p-fenilen-tereftalamid) PPD-T koji je postojan u klasičnim otapalima, međutim otapa se u visoko koncentriranim kiselinama [13]. Aramidna vlakna su postojana pri temperaturi od 400 °C, čvrstoća im je niža od ugljikovih vlakana, ali viša od staklenih vlakana što je vidljivo na slici 2.6.



**Slika 2.6. Dijagram rasteznih svojstava vlakana (1 ugljikova vlakna, 2 aramidna vlakna, 3 para-aramidna vlakna, 4 staklena vlakna, poli(eter-imid) (PEI), 6 poli(etilen-tereftalat) (PET), 7 celuloza, 8 poliamid (PA)) [13]**

Najveći nedostatak aramidnih vlakana je osjetljivost na UV zračenje i apsorpcija vode ako su izloženi vlažnoj atmosferi u duljem vremenskom razdoblju. Ovisno o uvjetima okoline mogu povećati masu i za 7 %. Zbog kristalne strukture pokazuju visoku otpornost na puzanje. Aramidna vlakna proizvode se ekstrudiranjem nakon čega slijedi pranje i neutralizacija vlakana te namotavanje i pakiranje [14]. Slika 2.7 prikazuje aramidna vlakna.





**Slika 2.7. Aramidna vlakna [15]**

#### *2.1.1.4 Prirodna vlakna*

Jedna od perspektivnijih biljaka za proizvodnju vlakana je kuraua čiji je plod sličan ananasu. Niska cijena i pogodna svojstva vlakana proširuju asortiman primjenjivosti. Za razliku od većine biljnih vlakana nemaju miris što je također jedna od prednosti za primjenu. [16] Na slici 2.8 prikazan je svežanj vlakana kuraue.



**Slika 2.8. Vlakna kuraue [17]**

Lanena vlakna su među najboljim vlaknima dobivenim od biljaka koje rastu u umjerenoj klimi. Biljka lana sastoji se od korijena, stabljike i grana koje nose kapsule sa sjemenjem. Za izradu lanenih vlakana rabi se središnji dio stabljike do 75 % visine biljke. Vlakna se odlikuju čvrstoćom i fleksibilnošću te slabim istezanjem prilikom naprezanja. Ova su vlakna i elastična, ali samo za mala istezanja. Do raspada vlakana dolazi pri temperaturama većim od 200 °C. Postojana su na razrijeđene slabe kiseline te lužnate otopine [5]. Na slici 2.9 prikazana su vlakna lana, gdje se može primijetiti da su slična vlaknima kuraue, a i ostalim vrstama prirodnih vlakana.



**Slika 2.9. Vlakna lana [18]**

Konoplja je vrlo zanimljiva biljka s agronomskog gledišta. Za rast ne zahtjeva ništa ili vrlo malo herbicida, pesticida i gnojiva. Karakterizira je brz rast, čime suzbija rast korova. Korisna je biljka za rotacijsku poljoprivredu jer obnavlja mineralni sastav tla. Upravo zato je interesantna činjenica zašto ta biljka nije raširenija s obzirom na mogućnosti uzgoja, no o mogućim uzrocima i razlozima neće biti razrađeno u ovome radu. Vlakna konoplje postojana su na vodu, odlikuju se dobrom prekidnom čvrstoćom, grublja su od lanenih, ali i čvršća. [5] Teško ih je izbijeliti, pa im je nijansa žuto-zelena, kao što se i vidi na slici 2.10.





Slika 2.10. Konoplina vlakna [19]

Vlakna jute i kokosa su slabijih svojstava, no za njihovu primjenu su takva svojstva i više nego dobra. Njihova svojstva se mogu vidjeti i usporediti sa svojstvima ostalih vlakana u tablici 2.1.

Tablica 2.1. Svojstva vlakana [5]

Vlakno	Gustoća, g/cm <sup>3</sup>	Prekidna čvrstoća, MPa	Modul rasteznosti, GPa	Specifična čvrstoća, MPa/ (g/cm <sup>3</sup> )	Prekidno istezanje, %	Apsorpcija vlage, %	Cijena po kg, USD
Stakleno vlakno	2,50 - 2,55	1 800 – 3 500	70,0 - 73,0	700 – 1 400	2,5 - 3,0	0	1,3
Lan	1,40 - 1,50	345 – 1 500	27,6 - 80,0	230 – 1 070	1,2 - 3,2	7	1,5
Konoplja	1,48	550 - 900	70	370 - 610	1,6	8	0,6-1,8
Juta	1,30 - 1,45	400 - 800	10,0 - 30,0	280 - 610	1,16 - 1,8	12	0,35
Agava	1,33 - 1,45	468 - 700	9,4 - 38,0	320 - 530	2,0 - 7,0	11	0,6-0,7
Kuraua	1,4	500 – 1 150	11,8	360 - 820	3,7 - 4,3	n/a	0,6

Prirodna vlakna su sigurnija za rukovanje u odnosu na sintetička vlakna, niske su cijene i manji je utrošak energije tijekom proizvodnje. Uštede su velike zbog manjeg trošenja kapitala na opremu jer prirodna vlakna nisu abrazivna. Osiguravaju i visoku zvučnu izolaciju, električki su nevodljiva pa primjenu pronalaze u dijelovima automobila gdje su takve karakteristike vrlo važne. Mehanička svojstva prirodnih vlakana su lošija od sintetičkih u vlažnim atmosferama, zato što su vrlo higroskopska pa se zbog toga stvaraju pore i slabe kemijske veze. Degradiraju na relativno nižim temperaturama, pa su temperatura obrade i izbor materijala matrice ograničeni. [5]

### **2.1.2 Kompoziti ojačani česticama**

Drveno brašno je ojačavalo u obliku čestica koje se rabi u kompozitima u automobilima. Uobičajene vrste drveta koje se primjenjuju su bor, javor i hrast. Najčešće se primjenjuje kombinacija tih vrsta drveta koja se nalaze kao otpad u drvenoj industriji [20]. Nakon što se prikupi određena količina i vrsta, drveni otpad se usitnjava u specijaliziranim mlinovima te se postiže željena struktura čestica. [21] Na slici 2.11 prikazana je struktura drvnog brašna.



**Slika 2.11. Drveno brašno [20]**

## **2.2 Polimerne matrice**

Matrica mora biti dovoljno kruta, ali mora biti otporna na širenje pukotine. Kontakt između vlakana i matrice mora biti dovoljno čvrst kako prilikom opterećenja ne bi došlo do odvajanja. Razlikujemo plastomerne, elastomerne i duromerne matrice.

### **2.2.1 Plastomerne matrice**

Plastomeri spadaju u najzastupljeniju skupinu polimera (90 % ukupne proizvodnje) pa je samim time i upotreba plastomernih matrica u automobilske industriji neizbježna [22]. Svojstvo plastomera je da omekšavaju i tale se dovođenjem topline, te ih je zbog toga lako prerađivati. Prilikom proizvodnje plastomernih matrica postižu se manji troškovi proizvodnje zbog navedenog svojstva. Plastomerne matrice su žilave što rezultira postojanošću na udarce i oštećenja [23]. Plastomerne matrice koje se rabe u automobilske industriji s različitim inačicama i kombinacijama s ojačavalima su: poliamidne, polikarbonatne i polipropilenske matrice. Posebno mjesto zauzimaju i visoko temperaturni plastomeri: poli(eter-eter-keton) (PEEK), poli(eter-imid) (PEI), poli(fenilen-oksidi) (PPO) i poli(fenilen-sulfid) (PPS). Svaka od nabrojanih matrica pronalazi primjenu ovisno o željenim svojstvima. Ako proizvod zahtjeva posebna svojstva odlikovana visokom čvrstoćom, žilavošću i krutošću pri visokim temperaturama tada će prikladnija matrica biti u skupini visoko temperaturnih plastomera. [24-50]

### **2.2.2 Duromerne matrice**

Duromeri su polimeri koji se sastoje od gusto prostorno umreženih makromolekula. Imaju visoku čvrstoću, tvrdoću i toplinsku postojanost [22]. Duromeri najčešće sadrže komponente koje čine umreživalo i očvršćivalo. Proces umreživanja počinje kada su komponente izmiješane pri sobnoj ili pri povišenoj temperaturi. Tijekom umreživanja postoje stanja kapljevine, polu-umreženog do potpuno umreženog stanja. Najvažnije duromerne matrice koje se rabe pri izradi automobila su poliesterske smole, epoksidne smole i vinil-esterske smole. Poliesterske smole su se ustalile u mnogim industrijama zbog niske cijene. Epoksidne smole su skuplje, ali imaju bolja mehanička svojstva, višu postojanost na djelovanje agresivnih medija i vode. Vinil-esterske smole imaju bolja mehanička svojstva od poliesterskih smola, postoje su na djelovanje nekih kiselina i lužina. Među duromernim matricama, važno mjesto zauzimaju i poliuretanske

matrice koje u nekim spektrima primjene pokazuju bolja svojstva od epoksidnih smola što će biti prikazano u poglavlju o primjenama [1, 37].

### 2.2.3 Elastomerne matrice

Elastomerne matrice zauzimaju izuzetno veliku ulogu u primjeni kompozita u automobilske industriji. Više od 45 % udjela svakog pneumatika sadrži mješavinu prirodnog i sintetskog kaučuka. Prirodni kaučuk dobiva se u obliku mliječne kapljevine drveta *lat. Hevea Brasiliensis* (slika 2.12).



**Slika 2.12. *Hevea Brasiliensis*, prirodni kaučuk [38]**

Nakon toga se dodaju kiseline koje očvršćuju materijal i uklanjaju vodu, nakon čega se sirovina suši u specijaliziranim sušionicama. Sintetski kaučuk dobiva se kao derivat sirove nafte. Smjesa sintetskog i prirodnog kaučuka je zbog svojih nepovezanih lančanih makromolekula mekana i ljepljiva, a pri nižim temperaturama tvrda i lomljiva, gotovo neupotrebljiva. Dodatkom aditiva lanci makromolekula se međusobno povezuju u procesu *vulkanizacije*. Tako se dobiva guma, materijal visoke elastičnosti, savitljivosti i žilavosti te dobre rastezne čvrstoće i otpornosti prema abraziji i bubrenju. Ovisno o dodatku aditiva neka će svojstva biti postojana pri nižim, a neka svojstva pri višim temperaturama [39, 40].

## 2.3 Vrste polimernih kompozita

Nakon kratkog pregleda vrsta matrica i ojačavala, bit će opisana svojstva i mogućnosti kombiniranja matrice s ojačavalom koje se rabe u automobilske industriji.

### 2.3.1 Poliamid ojačan staklenim i ugljikovim vlaknima

Poliamidi ili popularno zvani *najloni* postali su uobičajen materijal vrlo raširene primjene, stoga su vrlo često i na različite načine prisutni u svakodnevici pa tako i u industriji automobila. Svestranost poliamida je rezultat raspona povoljnih svojstava. Budući da svojstva proizlaze iz strukture materijala, poliamidi pripadaju skupini kristalastih plastomera, amorfna područja daju mu elastičnost, a lamelarni kristali čvrstoću, krutost, otpornost na trošenje, kemijsku i relativnu toplinsku postojanost. Poput većine polimernih materijala poliamid posjeduje dobra elektroizolacijska svojstva. Najveći nedostatak kompozita s poliamidnom matricom je higroskopnost, što znači da će nakon nekog vremena početi upijati vlagu iz atmosfere zbog čega će doći do sniženja svojstva. [41] Dodatkom staklenih vlakna u poliamidnu matricu povisuje se čvrstoća, krutost, otpornost na toplinske deformacije i abrazivno trošenje. [42] Staklenim vlaknima ojačan poliamid crne je boje što je uočljivo na slici 2.13.



**Slika 2.13. Poliamid ojačan staklenim vlaknima, korito za rezervni kotač, Audi A8 [43]**



Druga varijanta upotrebe poliamidne matrice je izvedba ojačana ugljikovim vlaknima. Rastezna čvrstoća i modul rasteznosti su nešto niži nego kod poliamida ojačanog staklenim vlaknima, ali znatno bolje specifične rastezne čvrstoće. Ostala svojstva su vrlo slična kao i kod poliamida ojačanog staklenim vlaknima pa i boja. [44] Na slici 2.14 prikazan je zupčanik od poliamida ojačan ugljikovim vlaknima. Interesantna je činjenica da se upotrebljavaju dugačka ugljikova vlakna, pa je zbog toga površina i izgled izratka drukčija nego li kod ostalih kompozita ojačanih ugljikovim vlaknima kod kojih se najčešće vidi i prepoznaje način na koji je izvedeno pletivo, što naravno ne mora biti uvijek tako.



**Slika 2.14. Zupčanik od poliamida ojačanog ugljikovim vlaknima, BMW X5 [45]**

### **2.3.2 Polipropilen ojačan staklenim i prirodnim vlaknima**

Najčešće ojačanje koje se rabi pri kompozitima s polipropilenskom matricom su staklena vlakna, zato što ona predstavljaju najbolji omjer uloženo-dobiveno u odnosu na ostala ojačavala. Postoji bitna stavka na koju treba pripaziti pri izradi takvog kompozita, a to je osiguravanje adhezije između vlakna i matrice, jer inače neće biti postignuta očekivana čvrstoća i stabilnost kompozita. Željena svojstva postižu se raznim aditivima, uz koju polipropilen ojačan staklenim vlaknima osigurava dobru tvrdoću, otpornost na zamor materijala te otpornost na agresivne medije i toplinu. [46] Polipropilen ojačan prirodnim vlaknima ima visoku rasteznu čvrstoću i modul rastezljivosti. Problem prirodnih vlakna je postupak završne obrade koji je kompliciraniji

nego kod staklenih vlakna. Ostala svojstva ovise o tipu prirodnog vlakna, što je objašnjeno u poglavlju 3.1.1.4. [47] Slika 2.15 prikazuje polipropilen ojačan vlaknima lana koja su pogodna za izradu unutrašnjosti automobila.



Slika 2.15. Polipropilen ojačan lanenim vlaknima [48]

### **2.3.3 Polikarbonat ojačan ugljikovim i aramidnim vlaknima**

Polikarbonat je plastomer izuzetno dobrih mehaničkih svojstva. Njegova svojstva osigurala su široku primjenu u tehnici, pa tako upotreba polikarbonatnih matrica zauzima mjesto u autoindustriji. Ojačavala koja se rabe su uglavnom ugljikova i aramidna vlakna. [49]

### **2.3.4 Poli(fenilen-oksidi) ojačan staklenim vlaknima**

Poli(fenilen-oksidi) ojačan staklenim vlaknima postojan je na agresivne okoline, ima izvrsna mehanička svojstva, postojan je na vodu i većinu otapala, dobar je izolator, postojan je pri visokim temperaturama. Zbog navedenih svojstava mnogi su metali i njihove legure izbačeni iz upotrebe. U automobilu ima nekoliko dijelova izrađenih od tog kompozita, no izrada tih dijelova od metalnih materijala teška je za izradu, što povisuje cijenu samog izratka, zbog čega je postao nezamjenjiv, no to će biti opisano u poglavlju o primjeni. [50]

### **2.3.5 Poli(fenilen-sulfid) ojačan staklenim vlaknima**

Poli(fenilen-sulfid) je kristalasti polimer s odličnom toplinskom i kemijskom postojanošću te vatrootpornosti. Materijal zadržava dobra svojstva i pri temperaturama do 200 °C kada počinje postupno snižavanje mehaničkih svojstava. [51] Nakon ojačavanja staklenim vlaknima dobiva se spoj već navedenih svojstava i dimenzijske stabilnosti, čvrstoće te krutosti. [52]

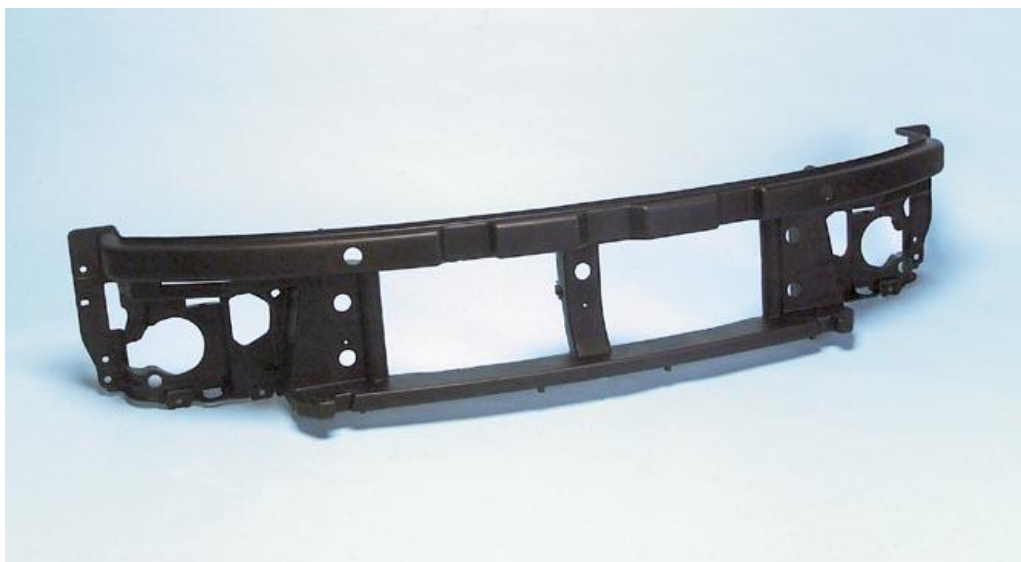
### **2.3.6 Poli(eter-eter-keton) ojačan ugljikovim i staklenim vlaknima**

PEEK je visoko temperaturni plastomer s odličnom postojanošću na kemijski agresivne okoline. Dodatkom ugljikovih i staklenih vlakna povisuje se rastezna čvrstoća i modul elastičnosti, no snizuje se ukupno produljenje. Maksimalna temperatura koju PEEK može izdržati je oko 160 °C, a dodatkom ugljikovih ili staklenih vlakana se maksimalna temperatura prije raspada povećava na oko 315 °C. [53]

### **2.3.7 Poli(etilen-tereftalat) ojačan staklenim vlaknima**

PET ojačan staklenim vlaknima ima vrhunska fizička svojstva te iznimnu toplinsku i kemijsku postojanost, uz stabilnost oblika i svojstava pri povišenim temperaturama. Odlikuje se visokom tvrdoćom i krutošću, mogućnošću bojanja površine, dobre otpornosti na abraziju i atmosferske uvjete. Nabrojana svojstva čine ga izvrsnim izborom za proizvodnju većih dijelova kao što su prednje maske automobila, ali i manjih dijelova, kao što su dijelovi metlice brisača, klimatizacije i grijanja. [54] Slika 2.16 prikazuje totalnu pomutnju u nazivlju, zato što prikazuje *vezni lim* napravljen od PET-a ojačanog staklenim vlaknima. Poanta je sljedeća, polimerni kompoziti su svojim svojstvima nadmašili većinu materijala u automobilske industriji, što znači da ni nekadašnji *vezni lim*, naziv koji se ustalio u govoru, više se ne može zvati vezni lim, jer postoji bolja inačica upravo od polimernog kompozita.





**Slika 2.16. PET ojačan staklenim vlaknima [55]**

### **2.3.8 Polistiren ojačan prirodnim vlaknima**

Polistiren je važan polimer zbog dobrih svojstava i niske cijene. Lako se prerađuje i pokazuje dobra svojstva važna za primjenu. [55]

### **2.3.9 Poli(eter-imid) ojačan staklenim vlaknima**

PEI ojačan staklenim vlaknima je svojstvima vrlo sličan PEEK-u ojačanome staklenim vlaknima, razlika je u tome što je manje postojan pri visokim temperaturama i rastezna čvrstoća je niža što rezultira i nižom cijenom. [56]

### **2.3.10. Poliesterske i epoksidne smole ojačane ugljikovim, aramidnim i prirodnim vlaknima**

U automobilske industriji se najčešće upotrebljavaju poliesterske smole u kombinaciji sa staklenim i prirodnim vlaknima, dok su epoksidne smole češće u kombinaciji s ugljikovim, aramidnim i prirodnim vlaknima. Mehanička svojstva i primjena obiju smola ovise o strukturi osnovnih komponenata, te o dužini i gustoći ojačavala. Ovisno o zahtijevanim svojstvima upotrebljavaju se određena ojačavala u obliku vlakna, što se može vidjeti u poglavlju 2.1.1 o vrstama i svojstvima vlakna. Epoksidne smole imaju višu čvrstoću i modul elastičnosti. Također im je niži koeficijent toplinskog rastezanja.

Čvrstoća veze između matrice i vlakana također je veća za epoksidne smole. Glavni nedostatak im je viša viskoznost u kapljevitom stanju i znatno su skuplje. [57]

#### ***2.3.11 Poliuretanske i vinil-esterske smole ojačane staklenim i ugljikovim vlaknima***

Kao i kod epoksidnih i poliesterskih smola, mehanička svojstva poliuretanskih i kompozita s vinil-esterskom matricom ovise o vrsti i rasporedu vlakna koja se odaberu za željenu primjenu. Ako su tražena svojstva visoke otpornosti i veće postojanosti materijala pri povišenim temperaturama, tada će u obzir dolaziti ugljična vlakna. Ako je ekonomski aspekt bitniji od predimenzionirano dobrih svojstava, tada će prevladavati staklena vlakna. [57]

#### ***2.3.12 Prirodni i sintetski kaučuk ojačan poliamidom, vlaknima aramida i metalnom žicom***

Svojstva poput visoke izdržljivosti, niske krutosti, visokog tališta i visoke pritisne čvrstoće karakteristična su za navedeni kompozit. Uz široku primjenu na svim cestovnim vozilima, postao je nezamjenjiv i moderni život postao bi nemoguć uz nedostatak tog materijala. [39]

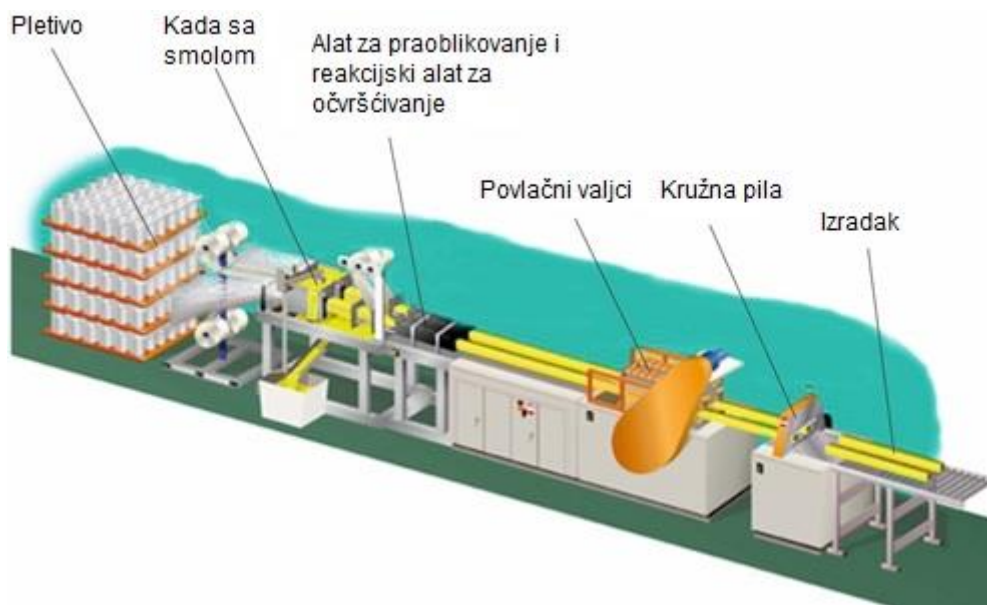
### 3. PROIZVODNJA POLIMERNIH KOMPOZITA

U ovome poglavlju bit će objašnjeni najčešći postupci proizvodnje polimernih kompozita. Razlikuju se sljedeći načini proizvodnje:

- 1) ručni dodirni postupak laminiranja
- 2) dodirni postupak štrcanjem
- 3) izravno prešanje SMC-a i BMC-a
- 4) pultrudiranje
- 5) namotavanje filamenata
- 6) postupak RTM (e. *Resin Transfer Moulding*)
- 7) podtlačno oblikovanje laminata
- 8) proizvodnja pneumatika.

#### 3.1 Pultrudiranje

Pultrudiranje je postupak povlačnog ekstrudiranja, prikladan za masovnu proizvodnju jednoosnih punih ili šupljih beskonačnih profila. Tim se postupkom prerađuju kompoziti s matricama od poliesterskih, vinilesterskih te epoksidnih smola u kombinaciji s ugljikovim, aramidnim ili staklenim vlaknima. Struk i pletivo natapaju se smolom, prolaze kroz mlaznicu za praoblikovanje, zagrijavaju se u protočnoj stazi i uz polireakciju i umreživanje očvršćuju. Povlačni valjci izvlače izradak koji se zatim reže na potrebnu duljinu. [4] Na slici 3.1 shematski je prikazan postupak pultrudiranja.

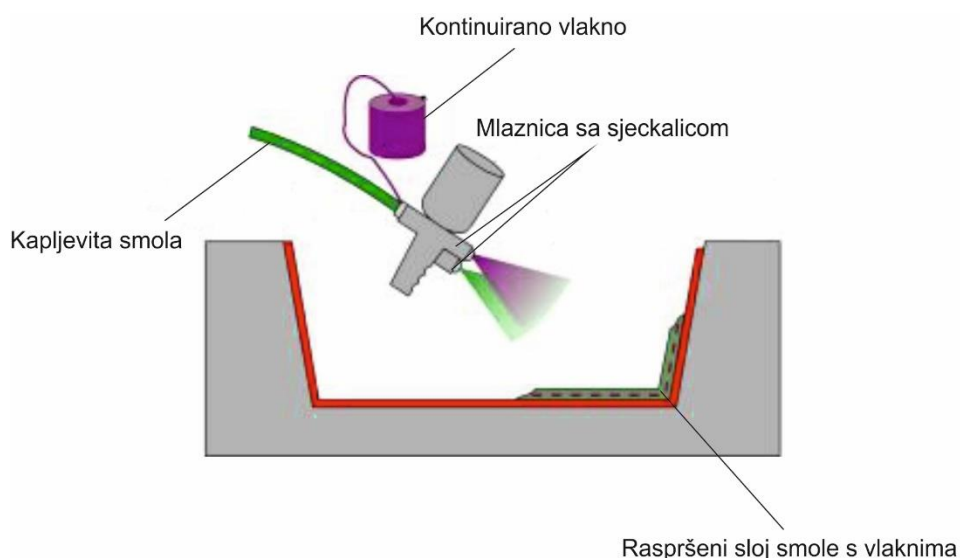


**Slika 3.1. Pultrudiranje [58]**

Prednosti kompozita dobivenih pultrudiranjem su: visoka čvrstoća i dobra mehanička svojstva u smjeru vlakana, kemijska postojanost, pogodnost obrade odvajanjem čestica, dimenzijska stabilnost, neograničena duljina profila i dobra kvaliteta površine. Najveći nedostatak postupka je što na taj način mogu biti proizvedeni profili koji imaju ograničenu veličinu u poprečnom smjeru. Mehanička svojstva su dobra samo u uzdužnom smjeru, a i nabava opreme je skupa. [4]

### 3.2 Dodirni postupak štrcanjem

Dodirni postupak sa štrcanjem je postupak dodirnog laminiranja koji se može ubrzati djelomičnim mehaniziranjem postupka ako se smjesa smole i isjeckanih vlakana nanosi na kalup pomoću stlačenog zraka. Smola se nalazi u dva spremnika, u jednome je pomiješana s umreživalom, a u drugome s ubrzavalom. Te se dvije smjese štrcaju odvojeno iz pištolja. Istodobno se štrca i vlakno u obliku struka, pa se sve te komponente spoje i očvršćuju tek na površini kalupa. Pri tome se uključeni zrak mora istiskivati valjkom. [4] Cijeli postupak je pojednostavljeno prikazan na slici 3.2



**Slika 3.2. Dodirni postupak štrcanjem [59]**

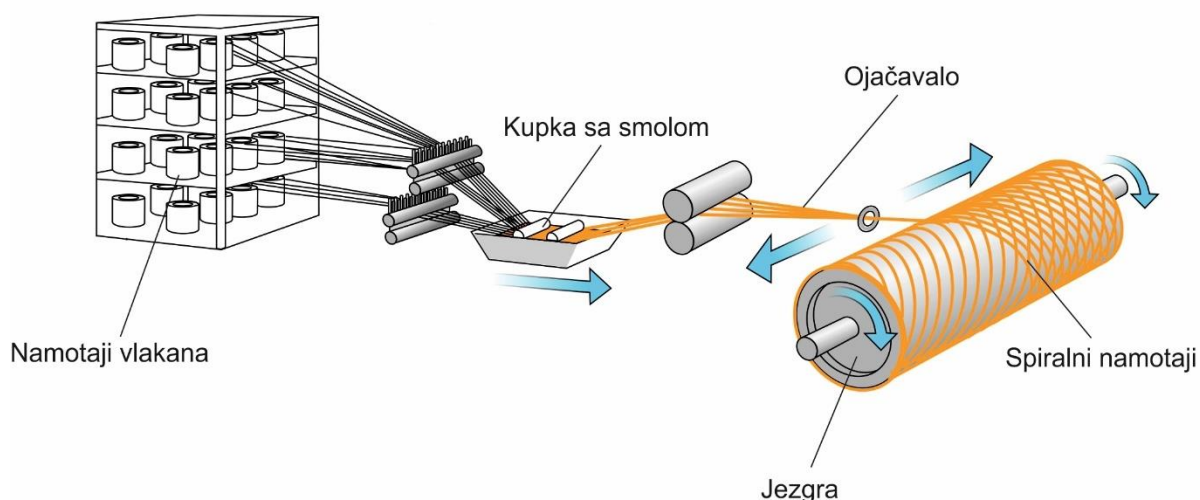
Kao materijal matrice upotrebljavaju se uglavnom poliesteri, dok se za ojačanje rabe staklena vlakna. Dodirni postupak štrcanjem ima široku primjenu već niz godina zato što je to vrlo jeftin način izrade polimernih kompozita. Mali trošak izrade alata uz visoku brzinu izrade i laku automatizaciju su isto neke od prednosti. Problem prilikom proizvodnje može predstavljati udio stirena koji je u nekim slučajevima zakonom ograničen, nešto veća količina nanošenja smole pa se time povećava i masa izratka. Smole moraju imati malu viskoznost kako bi se mogle naštrcavati, a to najčešće ide na štetu mehaničkih i toplinskih svojstava. [4] Na slici 3.3 prikazan je pištolj za dodirni postupak štrcanjem. Na pištolju se vide moguća dva dovoda materijala, jedan za polimernu smolu, drugi za ojačavalo u obliku vlakna. Na gornjem dijelu pištolja nalazi se sjekač koji reže i skraćuje vlakna.



Slika 3.3 Pištolj za dodirni postupak štrcanjem [60]

### 3.3 Namotavanje filamenata

Postupak obodnog namotavanja primjenjuje se u proizvodnji cilindričnih šupljih tijela različite duljine. Vlaknaste tvari u obliku struka ili traka prolaze kroz kadu i natapaju se smolom, a zatim se namotavaju na rotirajuću jezgru koja se može prema potrebi rastaviti ili uništiti. Kut namotavanja se može prema potrebi različito namjestiti, također se može namotavati i oko polova jezgre. Nakon toga se namotani oblik očvršćuje uz polireakciju i umreživanje. [4] Cijeli postupak može se vidjeti na slici 3.4.



Slika 3.4. Namotavanje filamenata [61]

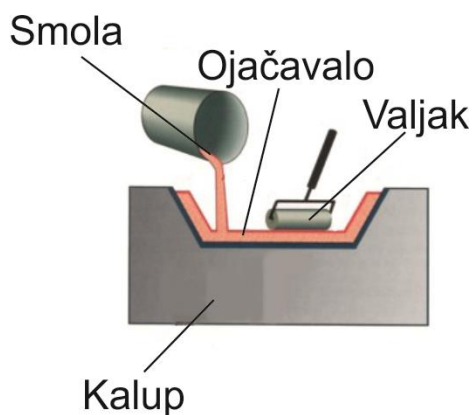
Postupak je vrlo brz i ekonomičan, može se regulirati udio smole na vlaknima. Troškovi proizvodnje su manji zato što se rabe pojedinačna vlakna, a ne tkanja. Ako se vlakna poslažu u smjeru djelovanja opterećenja dobivena su odlična mehanička svojstva. [4] Oblici proizvoda koji se dobivaju su ograničeni, ali svejedno imaju primjenu u automobilske industrije. Slika 3.5 prikazuje vratilo izrađeno namotavanjem ugljikovih vlakna.



**Slika 3.5. Vratilo izrađeno postupkom namotavanjem filamenata [62]**

### 3.4 Ručni postupak laminiranja

Na kalup premazan s tvari za lakše odvajanje kistom, nanosi se sloj smole spremne za polireakciju uz umreživanje bez ojačavala i punila. Zatim se redom nanose slojevi staklenog mata ili tkanine, natopljeni hladno umrežujućom smolom, a valjkom se istiskuje zrak zadržan između slojeva. [4] Postupak je shematski prikazan slikom 3.6.

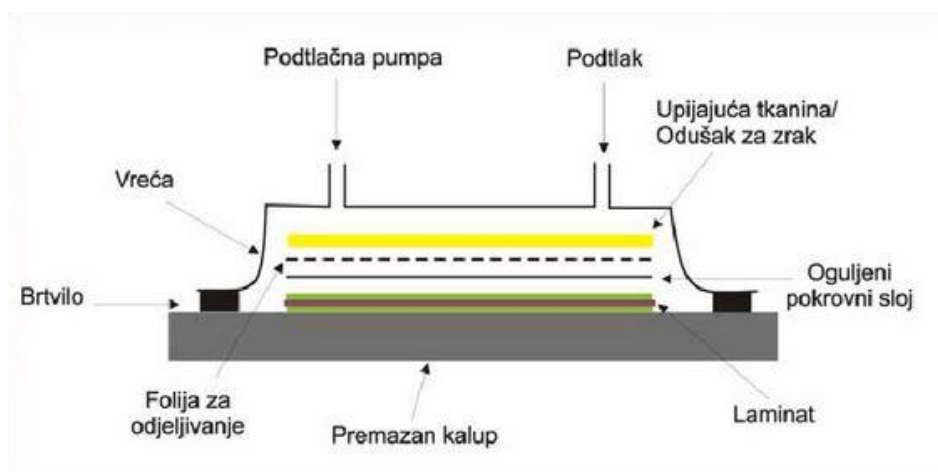


**Slika 3.6. Ručno laminiranje [63]**

Smola bez ojačavala i punila čini završni sloj u debljini dovoljnoj da pokrije stakleno ojačanje, te se na taj način dobiva slojevit izradak, *laminat*. Kalupi za ručno laminiranje otvoreni su i nastoje se graditi jednostavno i od jeftinih materijala. Matrice koje se upotrebljavaju pri izradi kompozita ručnim dodirnim postupkom laminiranja su epoksidne smole, poliesterske smole te vinil-esterske smole. Ojačavala mogu biti u obliku vlakna, i to svih tipova, problemi se jedino mogu javiti u slučaju težih aramidnih vlakana koje je teže ručno natopiti. U navedenom postupku postoji mogućnost izrade komplicirane geometrije i velikih volumena, veliki je asortiman materijala i dobavljača na raspolaganju, malen trošak izrade alata. Postupak je vrlo jednostavan i udio vlakna je veći nego kod postupka polaganja naštrcavanjem. Nedostatak postupka je što uvelike ovisi o vještinama i preciznosti radnika. Isto tako teško je proizvesti kompozite s malim udjelom smole, a da ne nastanu pukotine. [4]

### 3.5 Podtlačno ulijevanje

Postupak podtlačnog ulijevanja počinje ručnim slaganjem komponenata kompozita nakon čega se na njega stavlja polimerna folija. Pomoću podtlačne pumpe se uklanja zrak i podtlak kojim se poboljšava spajanje elemenata kompozita. Prevladavaju uglavnom epoksidne smole u kombinaciji s ugljičnim, aramidnim i prirodnim vlaknima. Na slici 3.7 prikazan je postupak podtlačnog ulijevanja.



Slika 3.7. Podtlačno oblikovanje [4]

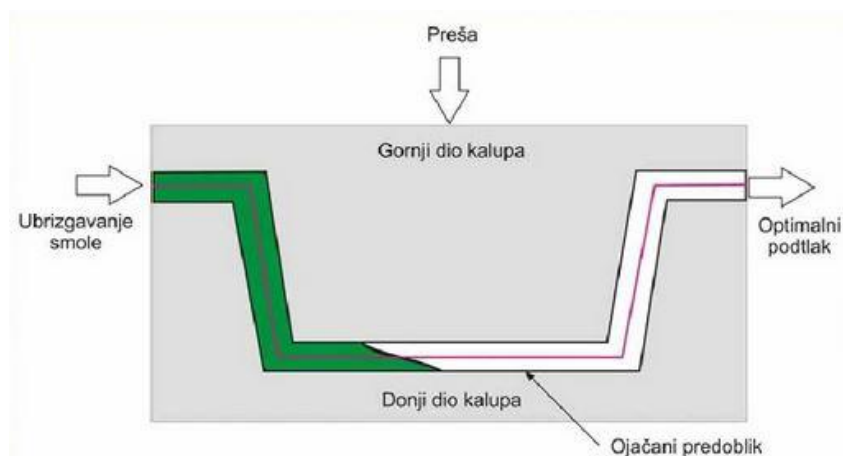
Za podtlačno ulijevanje uz nabrojanu opremu treba odvodnik smole, spiralna cijev za odvod zraka i viška smole, odvojiva folija, film za odjeljivanje, vreća za brtvljenje kalupa te gumeni profil za prijenos smole. Odvodnik smole sprječava usisavanje smole



zajedno sa zrakom jer prilikom popunjavanja proizvoda smolom, smola ulazi u cijevi za zrak. Spiralna cijev za odvod zraka i viška smole postavljena je na rub kalupa zato što se dovod smole uglavnom smješta na sredinu kalupa. Cijev ima propusnost po cijeloj duljini pa zrak izlazi jednoliko po rubovima kalupa te se može primijeniti i za dovodjenje smole, no tada otvori za propusnost služe za natapanje površine kalupa. Odvojiva folija stavlja se kad su vlakna postavljena u kalup. Najčešće se izrađuje od gusto pletenog poliamida impregniranog odvajalom. Folija se zalijepi za vlakna, ali se lagano kasnije skine. Njezina propusnost omogućava prolaz smole. Film za odjeljivanje stavlja se na odvojivu foliju ili izravno na vlakna i ne lijepi se na njih. Vreća kojom se brtvi i zatvara kalup je završni dio. Prvo se postavlja na jednu stranu kalupa gdje se brtvi trakom i zatim postavlja na suprotnu stranu kalupa. Gumeni profil za prijenos smole u potpunosti se napuni smolom i tek se tada počinju natapati vlakna i teći. Podtlačno ulijevanje upotrebljava se kod kompozita s većim udjelom vlakana. Podtlačni pokrov smanjuje količinu ishlapljenih štetnih tvari tijekom skrućivanja, bolje je vlaženje vlakana i protok smole kroz ojačanja zbog djelovanja povišenog tlaka. Postupak je nešto skuplji i zahtijeva prilično veliku vještinu operatera. [4]

### 3.6 RTM postupak

Injekcijsko posredno prešanje kapljevite smole s uloženim trodimenzionalnim ojačavajućim predoblikom započinje ubrizgavanjem smole u kalup koji se zatvara. Nakon što je kalup popunjen, zatvaraju se mjesta na kojima je ubrizgana smola i dolazi do skrućivanja pri povišenim ili sobnim temperaturama. Mogu se upotrijebiti sve vrste matrica i sve vrste vlakna. Budući da je smola zatvorena u kalup, ne predstavlja opasnost za okoliš. Ostvaruje se puno bolji izgled površine jer je udio pukotina u materijalu izrazito nizak. Pojavom mjesta na proizvodu koja nisu popunjena smolom dobiva se škart te na to treba biti posebno obraćena pozornost. [4] Postupak je shematski prikazan na slici 3.8.



Slika 3.8. RTM postupak [4]

### 3.7 Izravno prešanje

Postoje dva postupka izravnog prešanja, riječ je o hladnom i toplom prešanju. Kod hladnog izravnog prešanja, kalup se najprije premazuje odvajalom i gelnom prevlakom. Nakon toga se ulaže predoblik tkanine koja služi kako ojačavalo. Nakon toga se u kalup ulijeva odgovarajuća količina smole, poslije čega se kalup zatvara i smola se umrežuje pri sobnoj temperaturi. Hladno izravno prešanje je jeftiniji oblik proizvodnje, ali je zato i niže proizvodnosti. Kod toplog izravnog prešanja vlaknasti se preprezi ulažu u grijani kalup preše. Povišenom temperaturom i tlakom se postiže tečenje smjese smole i vlakana. Nakon što je kalupna šupljina popunjena, slijedi umreživanje pri čemu je kalup još uvijek pod tlakom. Nakon dovoljnog stupnja umreživanja, vade se otpresci iz kalupa i umreživanje se može nastaviti u pećima. Toplim izravnim prešanjem dobivaju se otpresci visoke krutosti i čvrstoće te visoke kvalitete površine. Budući da je postupak pogodan za masovnu proizvodnju, isplate se uzeti u obzir skupi strojevi i kalupi. [4]

### 3.8 Proizvodnja pneumatika

Proizvodnja pneumatika kompleksan je inženjerski postupak koji uključuje više faza i više od trideset različitih komponenata kako bi proizvod poprimio svoj konačan oblik i svojstva. Omjeri sastojaka ovise o tome na koja svojstva izdržljivosti pneumatika se cilja. Sastoji se od nekoliko vrsta kaučukovih smjesa, punila i ostalih sastojaka, izmiješanih u *Banburyjevim* gnjetilicama. One stvaraju crnu, gumastu smjesu koja se

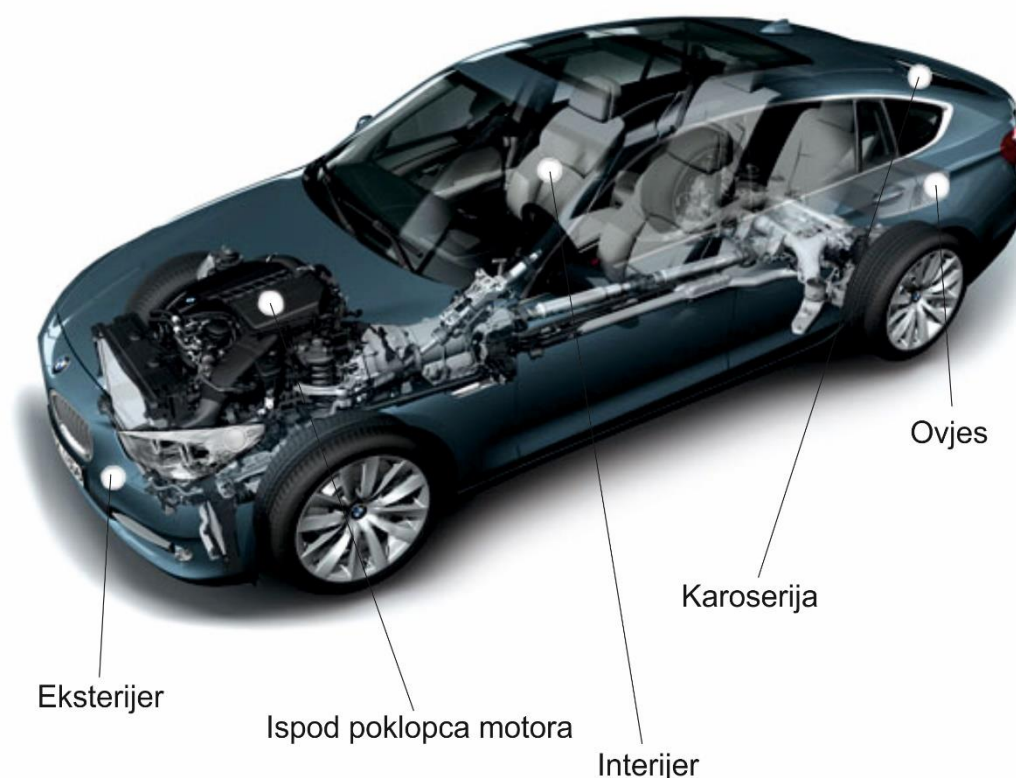
zatim šalje na valjanje. Kada se smjesa ohladi šalje se u poseban stroj za valjanje gdje se reže u trake koje će tvoriti osnovnu strukturu samog pneumatika. Tijekom valjanja, pripremaju se drugi elementi pneumatika, od kojih se neki oblažu drugom vrstom kaučukove smjese. Sam pneumatik izrađen je iznutra prema van. Aramidna vlakna, čelični remeni, stope, sloj, niti i ostali dijelovi postavljaju se u stroj za izradu pneumatika koji jamči da će svaki dio biti na pravom mjestu. To rezultira onim što izgleda kao relativno gotov proizvod, znan i kao pneumatik. Elastomerni dijelovi se zatim vulkaniziraju u vrućim kalupima u stroju za vulkanizaciju, svi dijelovi pneumatika komprimiraju se zajedno dajući pneumatiku njegov završni oblik, uključujući i uzorke profila te oznake proizvođača na bočnom zidu, završni dio postupka prikazan je na slici 3.9. [64]



**Slika 3.9. Kalup i stroj za vulkanizaciju za završnu fazu proizvodnje pneumatika [65]**

## 4. PRIMJENA POLIMERNIH KOMPOZITA

Nakon što su opisani postupci izrade polimernih kompozita, bit će prikazana važnost polimernih kompozita u primjeni. Gotovo je nemoguće zamisliti automobilsku industriju bez polimernih kompozita. U ovom poglavlju automobil će biti podijeljen na sljedeće sekcije kako bi pregled primjene bio jednostavniji: karoserija, eksterijer, interijer, ovjes, ispod poklopca motora. Navedene sekcije označene su na slici 4.1.



**Slika 4.1. Anatomija automobila podijeljena na sekcije [66]**

### 4.1 Karoserija

U ovoj skupini uglavnom se upotrebljavaju epoksidne smole ojačane staklenim ili ugljikovim vlaknima. Karoserija od polimernih kompozita u današnje vrijeme je popularna među super automobilima koji uz izuzetne specifikacije i najbolje *performanse* često oduzimaju dah svojom pojavom. Visoka čvrstoća, visoka tvrdoća, uz izuzetno malu masu najbitnija su svojstva za takvu vrstu karoserije. Troškovi izrade takve karoserije su izuzetno veliki, pa se zato upotrebljava samo u vozilima kojima su takva svojstva bitna, dakle u sportskim automobilima namijenjenim utrkama,

dokazivanju ubrzanja, brzine i pouzdanosti [67]. Izvrstan primjer je automobil *Lexus LFA* koji ima karoseriju koju 65 % čine polimerni kompoziti na bazi epoksidne smole ojačane ugljikovim vlaknima. Tim potezom, karoserija je olakšana za 100 kg što je izuzetno velika brojka [68]. *Lexus LFA* je besprijekoran u svakom segmentu, zato je i jasno čemu takva karoserija. Uz cijenu od 375 000 USD, jasnije je o kakvom se redu veličine radi kad je ekonomski aspekt u pitanju. [69] Slika 4.2 prikazuje karoseriju *Lexusa LFA*.



Slika 4.2. Karoserija *Lexusa LFA* [69]

Nešto jeftinija varijanta karoserije, a opet izuzetno dobrih i sličnih svojstava kao i ugljikovim vlaknima ojačana, je staklenim vlaknima ojačana epoksidna smola. Kod modela *Audi R8* upravo je upotrijebljena takva vrsta karoserije na *dijeti* te je masa smanjena za 31,5 kg [70]. Na slici 4.3 vidi se karoserija u kojoj se upotrebljava polimerni kompozit ojačan staklenim vlaknima.





**Slika 4.3. Karoserija Audi R8 [71]**

## 4.2 Eksterijer

Kad je eksterijer u pitanju, prvenstveno se misli na branike, poklopce motora, vrata i ostale obloge koje se mogu vidjeti na automobilu. Na *Corvetti Stingray* iz 2014. smanjena je masa upotrebljavajući kompozit poliamida ojačanog ugljikovim vlaknima na poklopcu motora, dijelovima krova, blatobranima, branicama, te zaštitnim dijelovima podvozja. Time je smanjena masa za 30 %, a jasno je da smanjenje mase uvijek znači veću iskoristivost, manju potrošnju dragocjenog goriva kojeg ima sve manje. Isto tako primijećeno je kako su praznine na spoju između blatobrana i branika manje, što znači da je proizvodnja preciznija, te da su odstupanja manja. [72, 73] Na slici 4.4 prikazana je *Corvetta Stingray*.



**Slika 4.4 Corvette Stingray [73]**

Iako se čini da su polimerni kompoziti relativno skupa tehnologija za primjenu u svakodnevnim automobilima, Ford je svojim prototipom za model Focus dokazao da će takva vrsta materijala s vremenom biti ustaljena i u automobile za širi krug kupaca. Istraživanjima je dokazano da će upotrebom kompozitnog poklopca motora postići veću sigurnost putnika i pješaka u slučaju nezgode. Isto tako smanjenjem mase, proporcionalno se smanjila potrošnja goriva što znači da su uvjeti zadovoljeni i da ideja neće ostati na prototipu [74]. Slika 4.5 prikazuje Ford Focus s poklopcem motora ojačanim ugljikovim vlaknima.



**Slika 4.5. Fordov poklopac motora ojačan ugljikovim vlaknima [75]**

Kao što je bio slučaj kod karoserije u poglavlju 4.1, postoji i jeftinija inačica dijelova eksterijera ojačana staklenim vlaknima, koja su nešto lošijih svojstava od dijelova ojačanim ugljikovim vlaknima pa je sukladno tome i cijena niža. Unatoč tome masa je i dalje niža nego li kod istih dijelova proizvedenih od metalnih materijala [75]. U poglavlju 2.3.7 spomenuta je zamjena za nekadašnji vezni lim izrađena od PET matrice ojačane staklenim vlaknima. Proizvod je pronašao primjenu zato što je puno bolje rješenje od ugljičnog čelika ili aluminija. Prva stavka je svakako masa, a na masu se nadovezuje i postojanost na koroziju, što automatski povlači jeftinije održavanje, nema potrebe za nikakvim premazima. Isto tako trajnost na udarni rad loma novije inačice veznog lima je veća. [55]

#### 4.3 Interijer

U poglavlju 5.2 spomenuto je da se polimerni kompoziti upotrebljavaju za izradu vanjskog dijela vrata automobila, te isto tako postoje unutarnji moduli vrata proizvedeni od polipropilenske matrice ojačane staklenim vlaknima. Nije potrebno ni spominjati, masa je smanjena uz bolja svojstva rastezne čvrstoće [76]. Bitna stavka je i postojanost pri višim temperaturama, budući da su moderni auti ispunjeni elektronikom, pa zato često kroz module vrata idu različite elektroničke instalacije, stoga radi sigurnosti materijal mora biti postojan pri visokim temperaturama. Budući da su paneli vrata pričvršćeni vijcima za vanjsku oplatu vrata, pozornost je obraćena i u tom segmentu, dakle prilikom pričvršćivanja vijcima, paneli se ne oštećuju. Otklanjanjem tog problema, nestao je i problem s neugodnim zvukovima prilikom nepravilnog dosjedanja vijka i proširivanja provrta pa je samim time i primjena modula tog tipa povećana i ustaljena u proizvodnji. Na slici 4.6 prikazan je modul vrata za *Chrysler Jeep Liberty* izrađen od polipropilena ojačanog staklenim vlaknima, tim proizvodom je tvrtka *Faurecia interior systems* nominirana za nagradu za inovativnost u 2010. [77]





**Slika 4.6. Modul vrata za *Chrysler Jeep Liberty* [77]**

Prirodna vlakna su u sadašnjosti najveću primjenu pronašla upravo u interijeru automobila. Pretežno se upotrebljavaju vlakna lana i konoplje u kombinaciji s polipropilenskom i poliamidnom matricom. Ovisno o željama kupaca i o cijeni automobila moguća je i kombinacija navedenih matrica s drvnim brašnom. Takva inačica unutarnjih oplata vrata je nešto jeftinija i ima zadovoljavajuća svojstva za tu primjenu. Zapravo se sve unutarnje oplata izrađene upravo od takvog kompozita. Naravno da posebna klijentela kupaca ima na raspolaganju i ugljikovim vlaknima ojačane matrice koje uz izuzetno malu masu nude i egzotičan izgled koji je zapravo najčešći razlog proizvodnje takvih *panela* [76]. Na slici 4.7 prikazani su *paneli* vrata iz *Ferrarija 430 Scuderie*.



**Slika 4.7. Panel vrata izrađen od matrice ojačane ugljikovim vlaknima [78]**

Isto nepisano pravilo vrijedi i za proizvodnju armaturnih ploča, koliko god se kod prethodno nabrojanih primjena razlika u masi pa time proporcionalno manja potrošnja goriva isplatila, kod unutrašnjosti automobila to nije slučaj. Trenutno je trend da najprestižniji automobili imaju kompozite ojačane ugljikovim vlaknima zbog egzotičnog izgleda [79]. Na slici 4.8 prikazana je armaturna ploča *Mercedesovog* prestižnog modela *SLS* u najprestižnijoj inačici *AMG*, cijena navedenog modela je oko 250 000 eura.



**Slika 4.8. Komandna ploča *SLS AMG-a* [80]**

Školjka sjedala nekih automobila ovisno o opremi također je izrađena od kompozita ojačanog vlaknima. Primjerice u *Opel Insigniji OPC* školjka sjedala je izrađena od poliamida ojačanog staklenim vlaknima, čime je postignuta 45 % manja masa nego kod modela s običnim sjedalima. Kompozit je izuzetno čvrst, zahvaljujući tom svojstvu debljina stijenke je svega 2 mm. Spomenuta sjedala su dobila certifikat organizacije neovisnih stručnjaka za zdrava leđa *AGR*. *AGR* izdaje certifikat o kvaliteti samo za sjedala koja zadovoljavaju visoke ergonomske standarde [81]. Na slici 4.9 se vide opisana sjedala i njihova struktura.



**Slika 4.9. Sjedala iz Opel Insignije OPC [81]**

Unutrašnjosti automobila se prožimaju različite tkanine, najčešće su to također polipropilenske matrice ojačane prirodnim vlaknima nabrojane u poglavlju 2.1. Nalaze se u obliku oplata vrata, tepiha, oplata prtljažnog prostora i krovnog tapetiranja. [22] Izuzetno oku i dodiru ugodan materijal, mješavina poliestera i poliuretana pod trgovačkim je nazivom *Alcantara* [82]. U poglavlju 3.3 spomenuto je npr. korito rezervnog kotača napravljeno od polimernog kompozita, ili sitni zupčanci koji se nalaze za pogon kazaljke kontrolne ploče. Isto tako dijelovi tunela ventilacije su također izrađeni od polimernih kompozita kao i središnja ogledala za bolju vidljivost i opreznost u vožnji. [5]

#### **4.4 Ovjes**

*Audi* je 2014. predstavio opruge amortizera izrađene od epoksidne smole ojačane staklenim vlaknima. Kompozitna inačica je 40 % lakša od čelične što iznosi 4,4 kg za sve četiri opruge. Prednost kompozitnih opruga je što su postojane na kemikalije i koroziju [83]. Postoje i lisnate opruge od epoksidne smole ojačane staklenim vlaknima koje su također zamijenile čelični materijal. Opruge od kompozitnog materijala bolje apsorbiraju vibracije te proizvode manje zvukova prilikom savijanja. Trajnost im je 5

puta veća nego li čelične opruge, a masa je također smanjena 5 puta [84]. Slika 4.10 prikazuje lisnatu oprugu za *Mercedes Sprinter* proizvedenu RTM postupkom.



**Slika 4.10. Lisnata Opruga proizvedena RTM postupkom [84]**

Automobilski pneumatici neizostavan su dio automobilske industrije. U današnje vrijeme troše se velike količine sredstava kako bi se poboljšala svojstva pneumatika. Pokušava se ostvariti što kraći put kočenja, bolje prianjanje uz površinu ceste i sigurnost kod vožnje u zavojima te niža potrošnja goriva i što veća izdržljivost. Ovaj napredak omogućen je eksperimentalnim putem primjenjujući različite omjere aditiva koji se dodaju smjesi kako bi bio omogućen maksimalni prijenos energije i niski otpor kotrljanja. Interesantni su tzv. *run flat* pneumatici koji imaju ojačanu bočnicu te je tako omogućen siguran nastavak vožnje u slučaju proboja pneumatika. Izazov današnjih proizvođača pneumatika je omogućiti odličan odaziv na mokroj i suhoj podlozi tj. odlična svojstva u svim uvjetima i smanjiti razinu buke [85]. Pneumatici idu na naplatke, a dosad aktualni naplatci od aluminijskih i magnezijevih legura past će u zaborav pojavom naplataka od polimernih kompozita. Upotrebom PEI matrice ili od epoksidne smole ojačane ugljikovim vlaknima smanjena je emisija CO<sub>2</sub> za 2 - 3 %, smanjena je masa za 20 kg po setu naplataka, svojstva su puno bolja, rastezna čvrstoća je 4,5 puta viša. Slika 4.11 prikazuje naplatak od epoksidne smole ojačane ugljikovim vlaknima. [86, 87]





**Slika 4.11. Naplatak od epoksidne smole ojačane ugljikovim vlaknima [88]**

#### **4.5 Ispod poklopca motora**

Ispod poklopca motora nalazi se mnogo dijelova, za koje se uglavnom smatra da su plastični, no zapravo je jedan dio njih načinjen od polimernih kompozita. Primjerice poklopac glave motora *Audija A8*, izrađen je od poliamida ojačanog staklenim vlaknima. Primarna funkcija poklopca glave motora je zaštita glave motora, no kod *Audija A8* iz 2011. opremljenog 3,2 *FSI* motorom tamo se nalazi i separator ulja. [89] Na slici 4.12 prikazan je poklopac glave Audijevog 3,2 *FSI* motora.



**Slika 4.12. Poklopac glave motora kod 3,2 FSI motora [90]**

Ispod poklopca motora krije se i kutija dovoda zraka koja također može biti od polipropilena ojačanog staklenim vlaknima čija je primjena do 120 °C, postojan je na kemikalije i atmosferilije, dobro podnosi vibracije i male je mase. Postoji i inačica s ugljikovim vlaknima, ali ugljikova vlakna se upotrebljavaju više zbog estetike. Upotrebljava se i polipropilen u kombinaciji s vlaknima konoplje, ali pretežito se rabi za čep posude antifrizu, ulja i sredstva za pranje stakla i farova. [5] Na slici 4.13 prikazan je čep otvora za dolijevanje ulja.



**Slika 4.13. Čep od polipropilena ojačanog konopljinim vlaknima [90]**

## 5. POSTOJEĆI ZAHTJEVI ZA MATERIJALE I NOVI TRENDОВI

Iako je prilikom obrađivanja tematike kroz poglavlja mnogo puta spomenuto koji je cilj uvođenja i upotrebe polimernih kompozita u automobile, *Repetitio mater studiorum est*, tj. ponavljanje je majka znanja. Potaknuti visokim cijenama goriva ali i elektrifikacije automobila, inženjeri ulažu veliki napor pri razvoju automobila kako bi ga usmjerili prema trendu: novi automobili moraju biti što lakši, no ujedno zadržati visoku razinu sigurnosti. Primjenom inovativnih polimera, stručnjaci pomažu pri projektima signifikantnog smanjenja mase vozila, uz istodobno pružanje pune slobode konstruktorima pri razvoju vozila. Nove lagane komponente predstavljaju hit među proizvođačima vozila, posebice u segmentu luksuznih vozila, pri čemu jamče apsolutnu sigurnost, unatoč rigoroznom programu skidanja mase vozila. Automobili će u budućnosti morati biti podvrgnuti ekstremnoj materijalnoj *dijeti*. U prošlosti su uređaji za klimatizaciju, sofisticirani audio sustavi, višefunkcionalna sjedala te ostale luksuzne *sprave* povisivali ne samo udobnost nego i masu automobila za po nekoliko stotina kilograma. U današnje vrijeme, trendovi idu u suprotnome smjeru, svi proizvođači automobila žele preokrenuti spiralu povišenja mase. Smanjenje mase vozila za stotinu kilograma smanjuje potrošnju goriva za pola litre na stotinu kilometara. Budući da se zalihe nafte i ostalih fosilnih goriva smanjuju, to je vrlo bitna stavka. Polimerni kompoziti imaju višestruko manju gustoću od aluminijskog, a čelik se ne mora ni spominjati. Razlog potpune primjenjivosti polimernih kompozita je što i dalje kompoziti nisu najjeftinije rješenje. Dakle, zadaća tehnologije i razvoja je ubrzati proizvodnju polimernih kompozita pa će sukladno tome i cijene biti prihvatljivije, te će se skuplje komponente ugrađivati i u automobile za široki krug ljudi. Još jedan bitan aspekt današnje proizvodnje je ekologija. Polimerni kompoziti nisu samo u znatnoj ekonomskoj prednosti u odnosu na druge materijale već ih nadvladavaju i s ekološkog stajališta jer pridonose smanjenju potrošnje energije, a time i smanjenje emisije stakleničkih plinova. Jedan od budućih ciljeva proizvodnje polimernih kompozitnih materijala je povećati primjenu u baterijama za električne automobile koji će polako, ali sigurno, povećati udio postojanja među ostalim automobilima, pogonjenima na fosilna goriva. [91, 92]

## 6. EKSPERIMENTALNI RAD

### 6.1 Uvod

U ovom djelu rada bit će opisan postupak izrade kompozitnog proizvoda podtlačnim oblikovanjem. Ukoliko se želi neki proizvod izraditi od kompozitnog materijala, bitno je poznavati točna svojstva materijala i svrsishodno tome odlučiti adekvatnost materijala za određen proizvod. Kao što je u poglavlju 2 vidljivo, postoji eksponencijalan broj opcija koji će se materijal matrice i ojačavala primjenjivati. Nakon što je odabrana vrsta matrice i ojačavala treba uzeti u obzir kakvu vrstu tkanja vlakna odabrati, te koji postupak izrade odabrati. Već je u prethodnim poglavljima spomenuto, svojstva materijala proizlaze iz njihove strukture, pa je tako i slučaj kod polimernih kompozita. Za izradu kompozitnih ploča odabrana je matrica od epoksidne smole ojačana hibridnim vlaknima koji se sastoje od aramidnih i ugljikovih vlakana.

Nakon izrade kompozitnih ploča bit će provedena ispitivanja mehaničkih svojstva proizvoda, kako bi se mogla usporediti sa svojstvima konvencionalnih materijala koji se upotrebljavaju u automobilske industriji pri izradi ojačanja odbojnika.

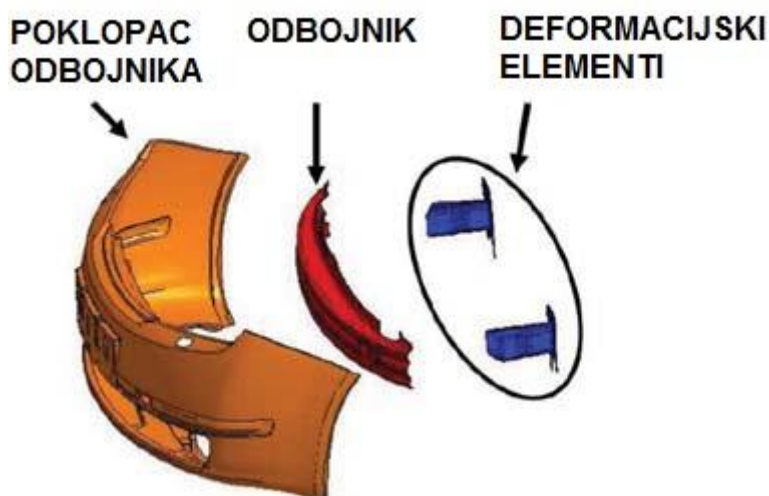
U Republici Hrvatskoj je u 2015. godini zabilježena 32 531 nesreća u prometu, pri tome je život izgubilo 348 osoba [93]. Ovakva statistika potiče razvoj boljih materijala u automobilske industriji kao što je napisano u poglavlju o pravcima razvoja kompozitnih materijala. Odbojnik automobila je jedan od ključnih faktora za deformiranje automobila jer se nalazi u zoni udara s prednje i stražnje strane automobila stoga mu je glavna zadaća zaštititi putnike u kabini automobila. Svaki odbojnik prije implemetacije treba zadovoljiti nekoliko kriterija mogućeg udara:

- 1) Direktan (frontalni) sudar
- 2) Udarac sa strane
- 3) Udarac u stup
- 4) Udarac u dijete
- 5) Udarac u pješaka

Dakle prilikom konstrukcije odbojnika treba uzeti u obzir amortiziranje udara, tako da nije dovoljno konstrukcijski i odabirom materijala proizvesti tvrdi element koji će



prilikom mogućeg kontakta s pješacima susret učiniti koban [94, 95]. Na slici 6.1 prikazani su glavni dijelovi odbojnika.



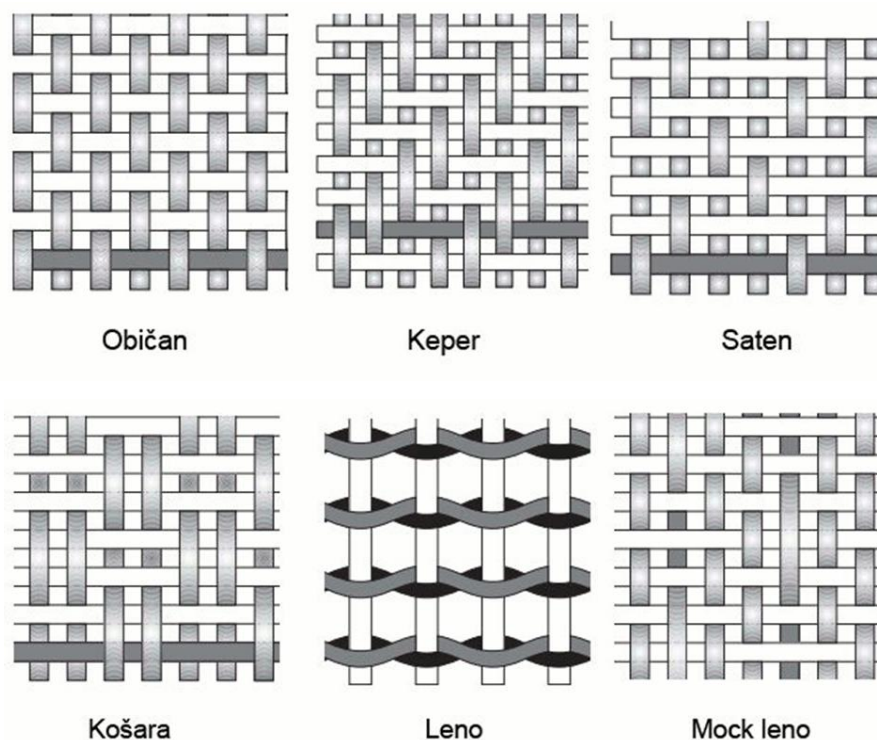
Slika 6.1. Dijelovi odbojnika [95]

Odbojnici se izrađuju od čeličnih i aluminijevih legura, no s obzirom na zahtjeve modernih automobila za smanjenjem mase, pitanje je vremena kada će kompozitni materijali u potpunosti zamijeniti konvencionalne materijale. Konvencionalni materijali poput čeličnih i aluminijevih legura su relativno lako dostupni, lako obradivi i jeftiniji pa su zato trenutno u prednosti pred kompozitnim materijalima [95, 96]. Velika prednost prilikom odabira metalnih materijala za izradu odbojnika je njihova mogućnost popravka postupkom deformiranja ukoliko dođe do oštećenja.

Cilj eksperimentalnog djela diplomskog rada je zaključiti da li se pravilnim odabirom hibridnog polimernog kompozita i postupkom podtlačnog oblikovanja mogu dobiti dobra mehanička svojstva za primjenu kao odbojnika automobila. Najbitniji dio rada je pravilan odabir vrste i slaganja hibridnog kompozita.

## 6.2 Odabir tkanja i rasporeda vlakana

Nakon što je odabrana vrsta polimerne matrice i vrsta ojačavala, potrebno je odabrati na koji način će vlakna biti raspoređena unutar matrice. Budući da kompoziti pokazuju najbolja svojstva kada sile i naprezanja djeluju u smjeru vlakana, odabrana su ugljikova vlakna tkana u obliku običnog tkanja te aramidna vlakna tkana u obliku saten veza prikazanog slikom 6.2

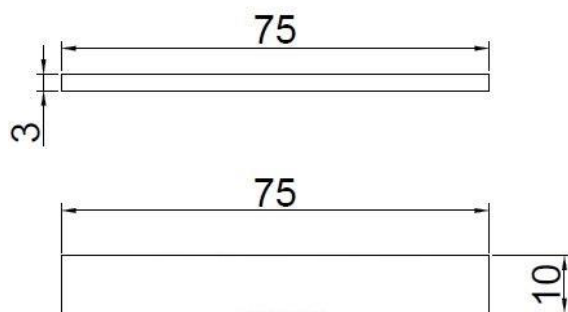


**Slika 6.2. Vrste tkanja ojačavala [97]**

Budući da prilikom potencijalnog udara automobila u neku zapreku, sile koje ojačanje odbojnika treba amortizirati djeluju u različitim smjerovima, pa je zbog toga odabrano rotiranje vlakana za  $45^\circ$ . Nakon što je odabrana vrsta tkanja i rotacija vlakana unutar matrice, potrebno je definirati na koji će se način polagati slojevi ojačavala u epoksidnoj matrici. Da bi se odabrao način polaganja slojeva ojačavala, trebaju biti poznata okvirna svojstva koja se trebaju postići. Ojačanje odbojnika treba dobru čvrstoću na površini, dok u sredini trebaju biti naglašena žilavija svojstva. Žilavija jezgra će ujedno i amortizirati potencijalni udar.

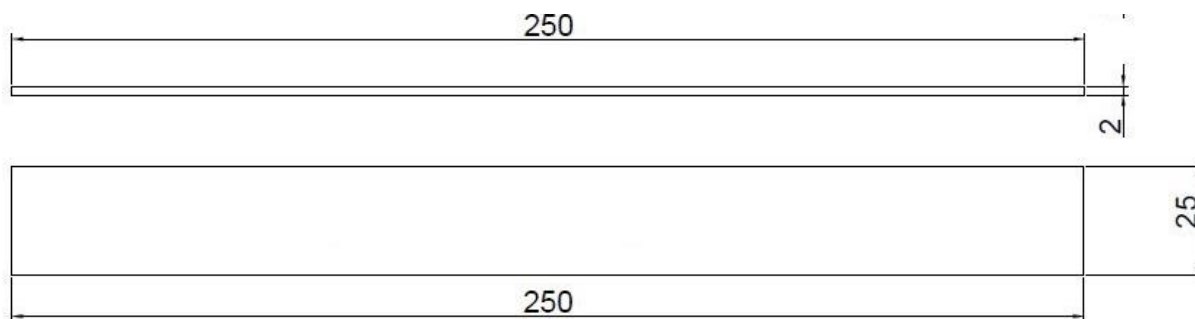
### 6.3 Definiranje parametara proizvodnje i mehaničkih ispitivanja

Kako bi se mogla provjeriti mehanička svojstva nekog materijala potrebno je izraditi ispitna tijela te prema tome napraviti potrebna ispitivanja. U ovome diplomskome radu su napravljana ispitivanja žilavosti, rasteznih i savojnih svojstava. Ispitna tijela za ispitivanje žilavosti su izrađena prema ISO 179-1, 2010 normi koja definira izgled ispitnog tijela prikazanog slikom 6.3 [98].



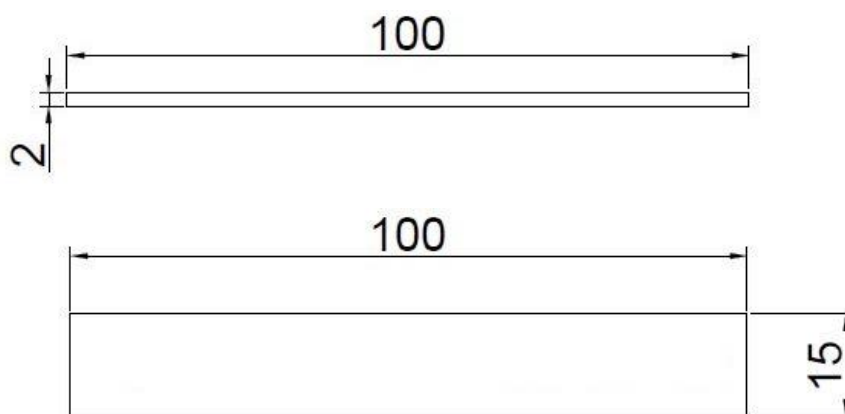
Slika 6.3. Ispitna tijela za ispitivanje žilavosti

Ispitna tijela za ispitivanje rasteznih svojstava izrađena su prema normi HRN EN ISO 527 4:2008 koja definira izgled ispitnog tijela prikazanog slikom 6.4 [99].



Slika 6.4. Ispitna tijela za ispitivanje rasteznih svojstava

Treća skupina ispitnih tijela bitna je za provođenje savojnih ispitivanja prema normi HRN EN ISO 14125:1998; A1 2011, izgled ispitnih tijela prikazan je slikom 6.5 [100].



**Slika 6.5. Ispitna tijela za ispitivanje savojnih svojstava**

Iz nacрта ispitnih tijela prema slikama 6.3, 6.4 i 6.5 vidljivo je da nisu sva ispitna tijela iste debljine. Prilikom ispitivanja žilavosti polimernih kompozita ojačanih tkanjima vlakana potrebno je izraditi tijela debljine 3 mm, dok je kod ostalih ispitivanja ispitnih tijela debljina 2 mm. Potrebno je svakako napomenuti da su za ispitivanja uzete minimalne dimenzije ispitnih tijela kako bi se uštedilo na materijalu, a da opet ispitivanja budu u skladu s potrebnim normama. Različite debljine ispitnih tijela, traže izradu dvije različite ploče iz koje će se kasnije izrezivati ispitna tijela. Jedna ploča će biti debljine 2 mm, a druga ploča će biti debljine 3 mm. Prilikom izrade proizvoda od kompozitnih polimera, potrebno je s obzirom na željena svojstva definirati kakva će se kombinacija matrice i ojačavala upotrebljavati kao što je opisano u uvodu eksperimentalnog dijela. Odabrana je kombinacija epoksidne smole ojačane hibridnim vlaknima ugljika i aramida. No problem i dalje nije riješen jer treba uzeti u obzir debljinu željenog proizvoda i prema tome odrediti na koji će se način slagati vlakna kako bi se postigla željena debljina proizvoda. Tablicom 6.1 prikazana su svojstva upotrijebljenih vlakana.

**Tablica 6.1. Svojstva upotrijebljenih vlakana**

	Ugljikova vlakna	Aramidna vlakna
Uzorak tkanja	Obično tkanje	Saten tkanje
Plošna masa tkanine	200 g/m	170 g/m
Debljina tkanine	0,2 mm - 0,25 mm	0,18 mm

Po tome su kompozitni materijali specifično drukčiji od ostalih postupaka proizvodnje, priprema proizvodnje je zahtjevnija i iziskuje više vremena. U nastavku je tablicama

6.2 i 6.3 prikazan raspored slaganja vlakana koji rezultira potrebnim debljinama ispitnih tijela tj. ploče iz koje će se izrezivati ispitna tijela.

**Tablica 6.2. Raspored slaganja vlakana za izradak debljine 3 mm**

Redni broj slaganja vlakana	Tip vlakna	Rotacija vlakna	Posignuta debljina ploče
1.	Ugljikova	0°	3 mm
2.	Ugljikova	45°	
3.	Ugljikova	45°	
4.	Aramidna	90°	
5.	Aramidna	90°	
6.	Aramidna	90°	
7.	Aramidna	90°	
8.	Ugljikova	45°	
9.	Ugljikova	45°	
10.	Ugljikova	0°	

**Tablica 6.3. Raspored slaganja vlakana za izradak debljine 2 mm**

Redni broj slaganja vlakana	Tip vlakna	Rotacija vlakna	Posignuta debljina ploče
1.	Ugljikova	0°	2 mm
2.	Ugljikova	45°	
3.	Aramidna	90°	
4.	Aramidna	90°	
5.	Aramidna	90°	
6.	Ugljikova	45°	
7.	Ugljikova	0°	

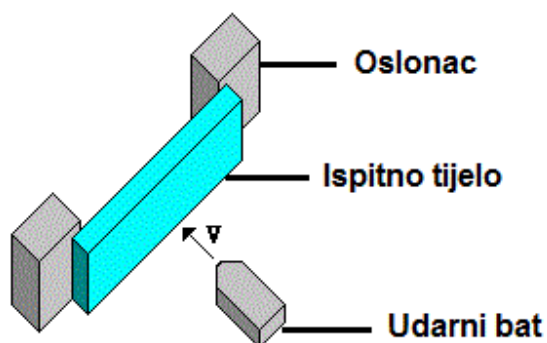
Iz tablice 6.2 vidi se da je za debljinu izratka od 3 mm potrebno čak 10 slojeva vlakana u obliku tkanja, a u tablici 6.3 vidljivo je da za ploču debljine 2 mm potrebno 7 slojeva. Tim podacima su ujedno kompletno definirani parametri proizvodnje, dakle odabrana je vrsta proizvodnog postupka, materijal tj. vrsta polimerne matrice i ojačavala te su definirane potrebne dimenzije gotovog izratka. Idući korak je definiranje parametara mehaničkih ispitivanja. Prema normi ISO 179-1:2010 koja između ostalog opisuje uvjete ispitivanja žilavosti polimernih kompozita, odabrano je da ispitna tijela nemaju

urezan zarez što je vidljivo na slici 6.3. Uređaj kojim se provodilo ispitivanje žilavosti je Charpyev bat AVK Budapest UT300 prikazan slikom 6.6.



**Slika 6.6. Charpyev bat AVK Budapest UT300**

Norma također definira razmak između oslonaca koji mora biti 62 mm, a ispitno tijelo mora biti postavljeno okomito na slojeve(e. *flatwise*) kao što je prikazano slikom 6.7.



**Slika 6.7. Orijentacija ispitnog tijela [101]**

Ispitno tijelo se postavlja na nosač naslonjen na oslonce prikazane na slici 6.7, nakon čega bat slobodnim padom udara u sredinu ispitnog tijela i na mjernoj skali zabilježava energiju kojom je udario o ispitno tijelo. Utrošena energija je bitna za izračunavanje udarne žilavosti ispitnog tijela prema jednadžbi:

$$a_{cU} = \frac{E_c}{h \cdot b} * 10^3 \quad (6.1)$$

gdje je:

$a_{cU}$  – savojna žilavost po *Charpyu*, kJ/m<sup>2</sup>

$E_c$  – energija apsorbirana udarcem, J

$h$  – debljina ispitnog tijela, mm

$b$  – širina ispitnog tijela, mm

Broj ispitnih tijela je također definiran normom i iznosi minimalno 5 komada, pa ih je toliko i izrađeno.

Kao što su navedena pravila prema kojim se ispituje udarna žilavost polimernih kompozita, tako postoje pravila za ispitivanje rasteznih svojstava polimernih kompozita i definirana su normom koja je već spomenuta prilikom opisivanja ispitnog tijela. Riječ je o normi HRN EN ISO 527-4:2008 kojom je definirano da brzina ispitivanja mora biti 2 mm/min. Razmak između čeljusti mora biti 150 mm za ispitna tijela prikazana slikom 6.4. Ispitivanje rasteznih svojstava je izvršeno na kitalici *Shimadzu AG-IC 300 kN* (slika 6.8). Neke od bitnih specifikacija kitalice su:

Maksimalno opterećenje:	300 kN
Preciznost ispitivanja:	± 0,5 % željene sile
Raspon brzine ispitivanja:	0,0005 mm/min – 500 mm/min [102]



**Slika 6.8. Kidalica Shimadzu AG-IC 300 kN za ispitivanje rasteznih svojstava**

Kidalica je numerički upravljana, te pomoću ekstenziometra automatski bilježi potrebne sile i izračunava svojstva. Rastezna čvrstoća računa se pomoću jednadžbe:

$$R_m = \frac{F_{max}}{h \cdot b} \quad (6.2)$$

Pri čemu je:

$R_m$  – rastezna čvrstoća, MPa

$F_{max}$  – maksimalna sila opterećenja, N

$h$  – debljine ispitnog tijela, mm

$b$  – širina ispitnog tijela, mm



Modul rastezljivosti se izračunava pomoću jednadžbe:

$$E = \frac{R_2 - R_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (6.3)$$

Pri čemu je:

$E$  – modul rastezljivosti (MPa)

$R$  – rastezna čvrstoća (MPa)

$\varepsilon_1$  – istezanje od 0,05 %

$\varepsilon_2$  – istezanje od 0,25 %

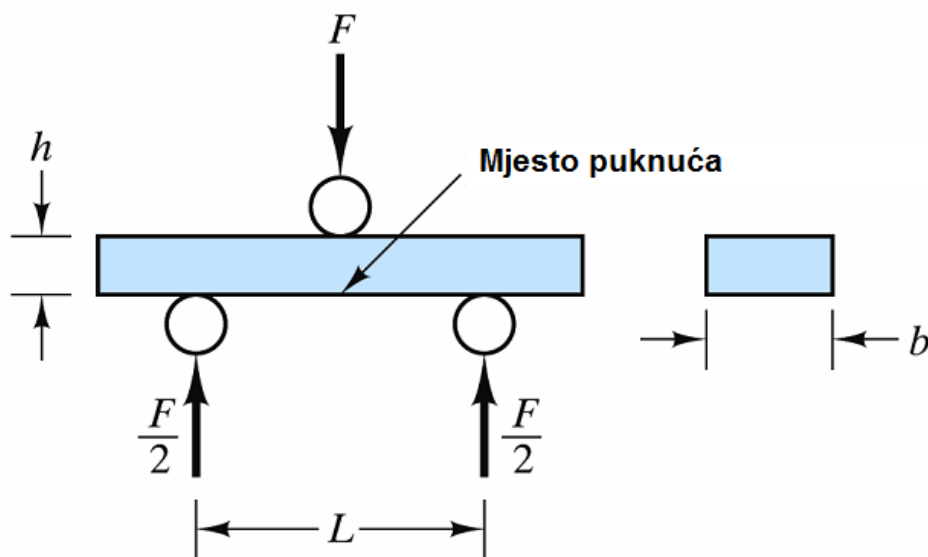
Slikom 6.9 prikazano je ispitno tijelo u steznoj čeljusti s postavljenim ekstenziometrom za mjerenje vrijednosti ispitivanja.



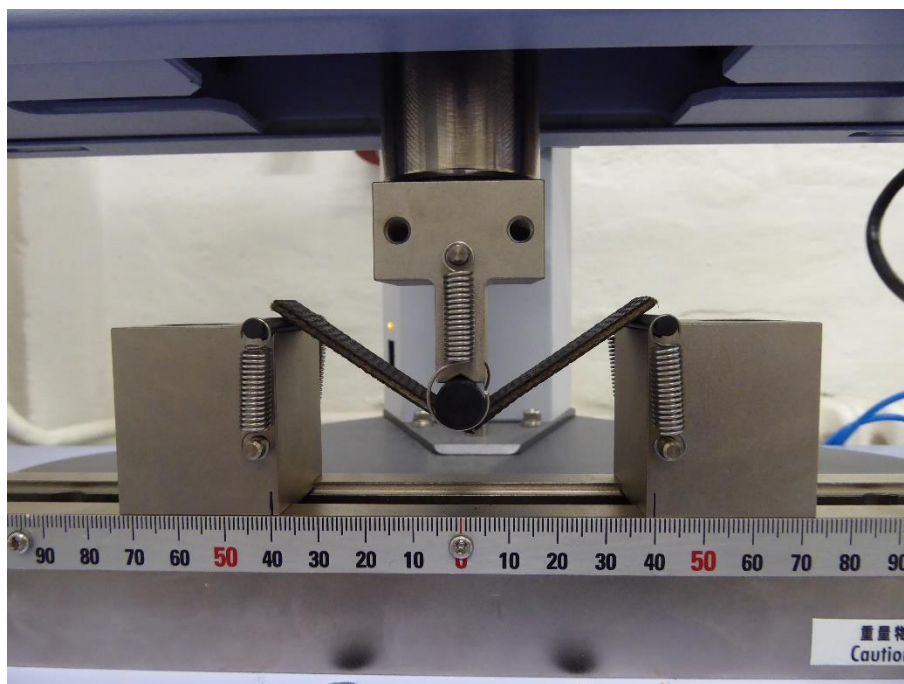
**Slika 6.9. Prikaz ispitnog tijela s ekstenziometrom u steznoj čeljusti**

Zadnje ispitivanje koje je provedeno je ispitivanje savojnih svojstava u skladu s normom HRN EN ISO 14125:1998; A1:2011. Kao što je već opisano na početku poglavlja, ispitna tijela moraju biti dimenzija prikazanih na slici 6.5. Brzina ispitivanja je

bila 2 mm/min, razmak između donjih oslonaca mora biti  $L = 80$  mm. Skica postupka prikazana je slikama 6.10 i 6.11.



**Slika 6.10. Prikaz postava oslonaca i opterećenja kod savojnog ispitivanja [103]**



**Slika 6.11. Ispitivanje savojnih svojstava na kidalici**

Zadnji element koji je potrebno parametrizirati prije ispitivanja materijala na savijanje je promjer oslonaca pomoću kojih se vrši savojno ispitivanje. Gornji valjak s kojim se

vrši opterećenje prema slici 6.10 i 6.11 je promjera  $D_1 = 10$  mm, a donji oslonci moraju biti promjera  $D_2 = 4$  mm.

Ispitivanje je izvršeno pomoću uređaja *Shimadzu AGS-10kNX* prikazanog slikom 6.12, a neke od bitnih specifikacija su:

Maksimalno opterećenje:	10 kN
Preciznost ispitivanja:	$\pm 1$ % željene sile
Raspon brzine ispitivanja:	0,001 mm/min – 1000 mm/min [104]



**Slika 6.12. Shimadzu AGS-X za ispitivanje savojnih svojstava**

Potrebna jednačina za izračunavanje savojne čvrstoće je dana u nastavku:

$$\sigma_s = \frac{3F \cdot L}{2b \cdot h^2} \quad (6.4)$$

Pri čemu su:

$\sigma_s$  – savojna čvrstoća, MPa

$F$  – sila opterećenja, N

$L$  – razmak između oslonaca, mm

$b$  – širina ispitnog tijela, mm

$h$  – debljina ispitnog tijela, mm

Jednačina za izračunavanje modula savitljivosti glasi:

$$E_f = \frac{L^3}{4 \cdot b \cdot h^3} \left( \frac{\Delta F}{\Delta s} \right) \quad (6.5)$$

Pri čemu su:

$E_f$  – modul savitljivosti, MPa

$L$  – razmak između oslonaca, mm

$F$  – sila opterećenja, N

$b$  – širina ispitnog tijela, mm

$h$  – debljina ispitnog tijela, mm

$s$  – progib ispitnog tijela, mm

Jednačina za izračunavanje progiba je dana u nastavku:

$$s' = \frac{\varepsilon_{f'} \cdot L^2}{6 \cdot h} \quad s'' = \frac{\varepsilon_{f''} \cdot L^2}{6 \cdot h} \quad (6.6)$$

Pri čemu su:

$s$  – progib ispitnog tijela, mm

$\varepsilon_f$  – savojno istezanje

$L$  – razmak između oslonaca, mm

$h$  – debljina ispitnog tijela, mm

Nakon što su definirani svi parametri ispitivanja mehaničkih svojstva, može se krenuti s proizvodnjom kompozitne ploče iz koje će se izrezivati ispitna tijela. Rezultati testiranja bit će opisani u posebnom poglavlju o mehaničkim svojstvima dobivenim nakon proizvodnje.

## 7. PROIZVODNJA POLIMERNOG KOMPOZITA PODTLAČNIM OBLIKOVANJEM

### 7.1 Priprema proizvodnje

Proizvodnja polimernog kompozita podtlačnim oblikovanjem zahtjeva opsežnu pripremu koja će biti prikazana u nekoliko najbitnijih koraka. Prva stavka koju treba pedantno izvršiti je rezanje vlakana prema željenim dimenzijama izratka. Ugljikova vlakna se jednostavno režu i kroje u željene dimenzije prema dimenzijama ploče (300 mm x 300 mm), dok je kod krojenja aramidnih vlakana proces puno kompliciraniji što dodatno naglašava žilavost vlakana. Slikom 7.1 su prikazana aramidna vlakna nakon što su pokušaja rezanja skalpelom pomoću pozamašne sile i broja ponavljanja.



**Slika 7.1. Krojenje aramidnih vlakana**

Iz slike je vidljivo da je nakon potezanja skalpelom samo narušen raspored vlakana, no ona su i dalje ostala ne izrezana. Tablicom 7.1 prikazana su svojstva upotrebljavanih vlakana.



Nakon krojenja ojačavala potrebno je pripremiti kalup. Kao jednostrani kalup upotrebljavana je ploča izrađena od komprimiranog drvnog brašna s glatkom površinom (oplemenjena iverica). Prvo je potrebno temeljito očistiti površinu kalupa otapalom, kako bismo uklonili moguće nečistoće na površini kalupa koje će kontaminirati pripremak. Za čišćenje površine kalupa upotrebljen je aceton tvrtke *Kemplastika* prikazan slikom 7.2. Na slici 7.2 je ujedno prikazan kalup od oplemenjene iverice.



**Slika 7.2. Čišćenje površine kalupa acetonom**

Nakon očišćene površine kalupa nanescena su tri sloja voska kako bi se zapunile moguće nepravilnosti na površini kalupa, ipak je riječ o drvenom kalupu koji nije tretiran posebnom obradom kako bi se dobila zadovoljavajuća kvaliteta površine. Vosak ujedno ima funkciju odvajala jer sušenjem voska stvara se zaštitni sloj koji omogućuje lakše odvajanje izratka od kalupa na kraju proizvodnje. Slikom 7.3 prikazan je vosak na bazi silikona [105] *mould release wax* tvrtke *Rexco* koji je upotrebljavan prilikom pripreme kalupa.



**Slika 7.3. Vosak tvrtke Rexco upotrebljavan za pripremu površine kalupa**

Prilikom aplikacije voska upotrijebljena je spužvica kojom se vosak ravnomjerno raspoređuju po površini kalupa. Odvajalo se nanosi 3 puta i između svakog sloja čeka se 15 minuta za sušenje. Nakon svakog nanošenja potrebno je polirati površinu krpom. Budući da je kalup očišćen prije nanošenja voska, potrebno je obratiti pažnju na mogućnost kontaminacije kalupa te je u tom slučaju potrebno ukloniti sve nečistoće kako bi izradak imao što kvalitetniju površinu.

Iduća stepenica koju je potrebno svladati je priprema matrice. Upotrijebljena je epoksidna smola *HEXION™ Specialty Chemicals L285* proizvođača *G. Angeloni* u kombinaciji s umreživalom *HEXION™ Specialty Chemicals H286* istoimenog proizvođača kao i epoksidna smola. Navedena smola ima izuzetno široku primjenu u automobilske industriji, brodogradnji, zrakoplovstvu te industriji sportske opreme. Može se primjenjivati pri temperaturnom rasponu od  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ , u kombinaciji sa staklenim, ugljikovim i aramidnim vlaknima. Vrijeme potrebno za početak geliranja smole je oko 40 minuta, dok su za potpuno umreživanje potrebna 24 sata [106]. Maseni



udjeli miješanja epoksidne smole i umreživala je u odnosu 2,5:1, što znači da na 140 g mješavine 100 g smjese čini epoksidna smola, a ostalih 40 g čini umreživalo. Budući da je potrebno zadovoljiti masene udjele konstituenata, miješanje matrice je izvršeno na vagi. Slikom 7.4 prikazano je miješanje epoksidne smole i umreživala na vagi.

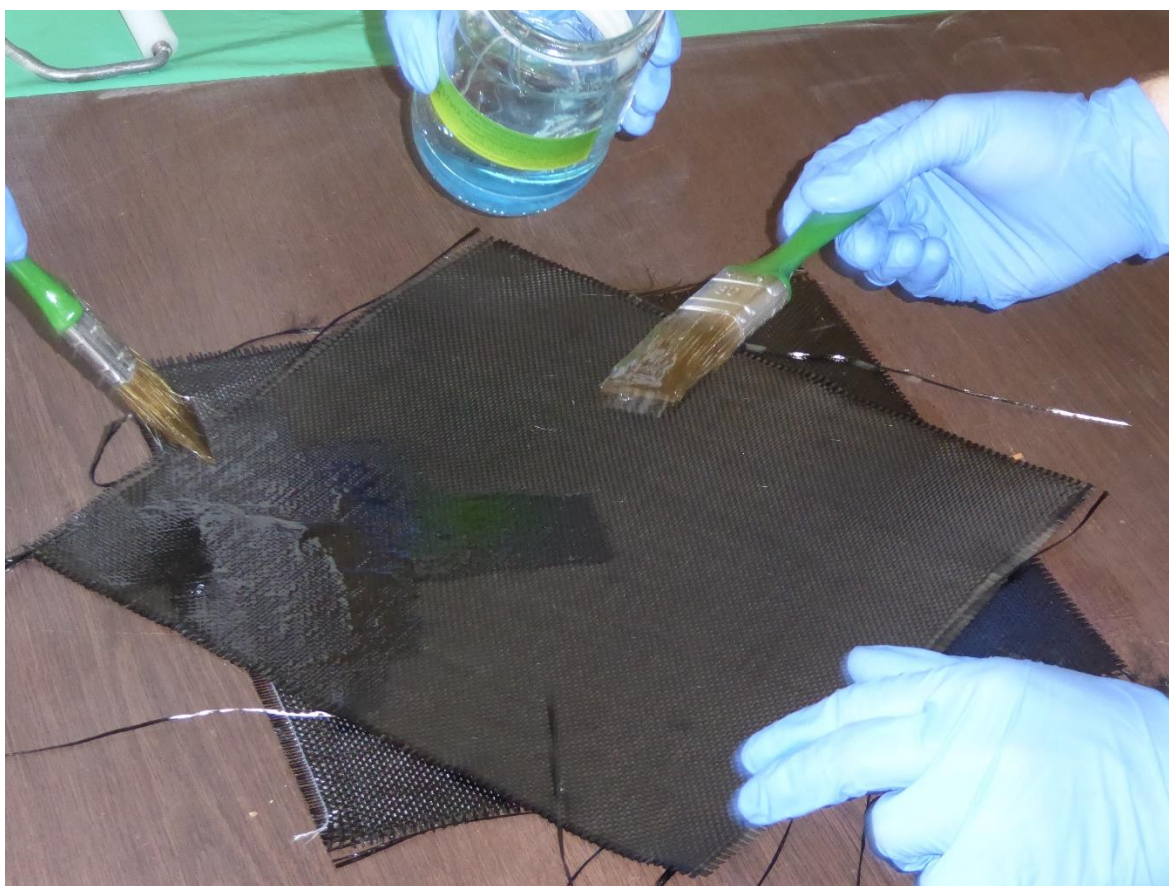


**Slika 7.4. Miješanje epoksidne smole i umreživala**

Na slici 7.4 se također vide različite boje konstituenata mješavine. Epoksidna smola je prozirne boje, dok je upotrebljavano umreživalo plave boje. Kako bi se ostvarilo pravilno umreživanje potrebno je matricu dobro promiješati dok smjesa ne poprimi homogen izgled. Ukoliko smjesa nije dobro izmiješana, u nekim dijelovima smjese neće biti zadovoljen maseni omjer 2,5:1 što može rezultirati nepotpunim umreživanjem. Budući da na površini kalupa vosak obavlja zadaću odvajala, potrebno je odvajalo i za gornji dio izratka. Budući da se radi o otvorenom kalupu s gornje strane se stavlja skrojena tkanina za odjeljivanje (e. *peel - ply*) koja omogućava odvajanje izratka od tkanine za upijanje viška smole (e. *breather*). Ovim korakom je završena faza pripreme proizvodnje nakon koje slijedi faza izrade kompozitne ploče.

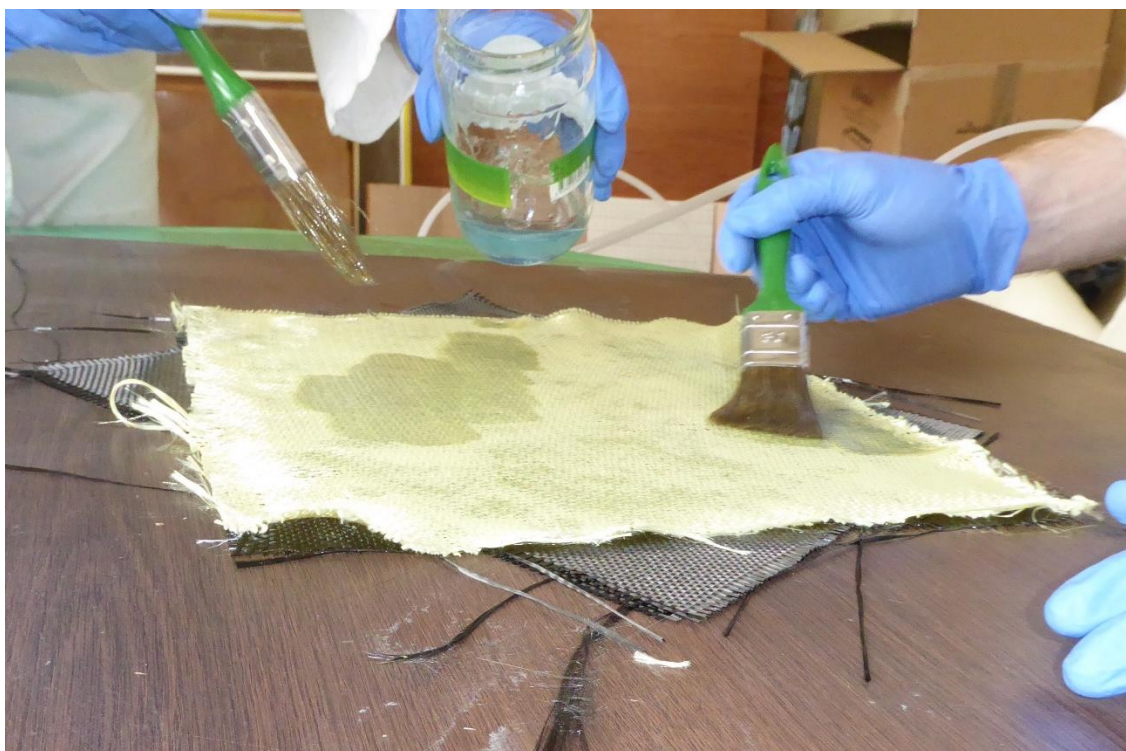
## 7.2 Izrada kompozitne ploče

Prvi korak izrade kompozitne ploče sadržava premazivanje kalupa matricom u obliku epoksidne smole pomiješane s umreživalom. Nakon toga slijedi slaganje izrezanih vlakana prema rasporedima danim u tablicama 6.1 i 6.2. Slikama 7.5, 7.6 i 7.7 prikazan je postupak slaganja vlakana te premazivanja istih epoksidnom smolom.

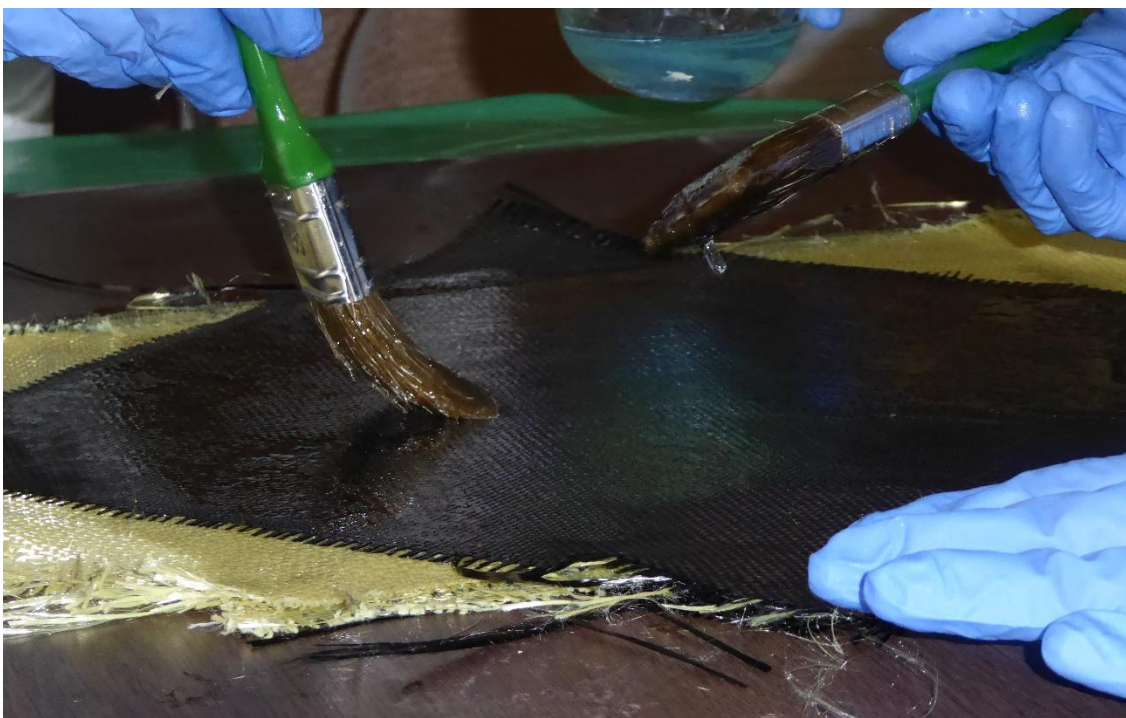


**Slika 7.5. Postupak premazivanja ugljikovih vlakana epoksidnom smolom**





**Slika 7.6. Postupak premazivanja aramidnih vlakana epoksidnom smolom**



**Slika 7.7. Postupak premazivanja zadnjih slojeva ugljikovih vlakana epoksidnom smolom**

Na slikama 7.5, 7.6 i 7.7 se vidi različita rotacija vlakana ovisno o slojevima kako bi se postigla bolja svojstva u više različitih smjerova. Nakon što su poslagani svi slojevi vlakana, potrebno je staviti tkaninu za odjeljivanje (e. *peel – ply*), što je ujedno prikazano slikom 7.8.



**Slika 7.8. Postavljanje tkanine za odjeljivanje**

Na slici 7.8 je vidljivo kako višak smole probija kroz tkaninu za odjeljivanje. Budući da je primarna zadaća tkanine za odjeljivanje osiguravanje odvajanja kompozitne ploče od ostali elemenata (alata) postupka potrebno je staviti i tkaninu za upijanje viška smole (e. *breather*) da upije višak smole, jer ukoliko smola dođe do ventila pomoću kojeg će se ostvariti veza između kompozita i izvlačenja viška zraka pumpom, uništiti će se ventil i pumpa. Stavljanje tkanine za upijanje viška smole i ventila prikazano je slikom 7.9.



**Slika 7.9. Postavljanje tkanine za upijanje viška smole i ventila**

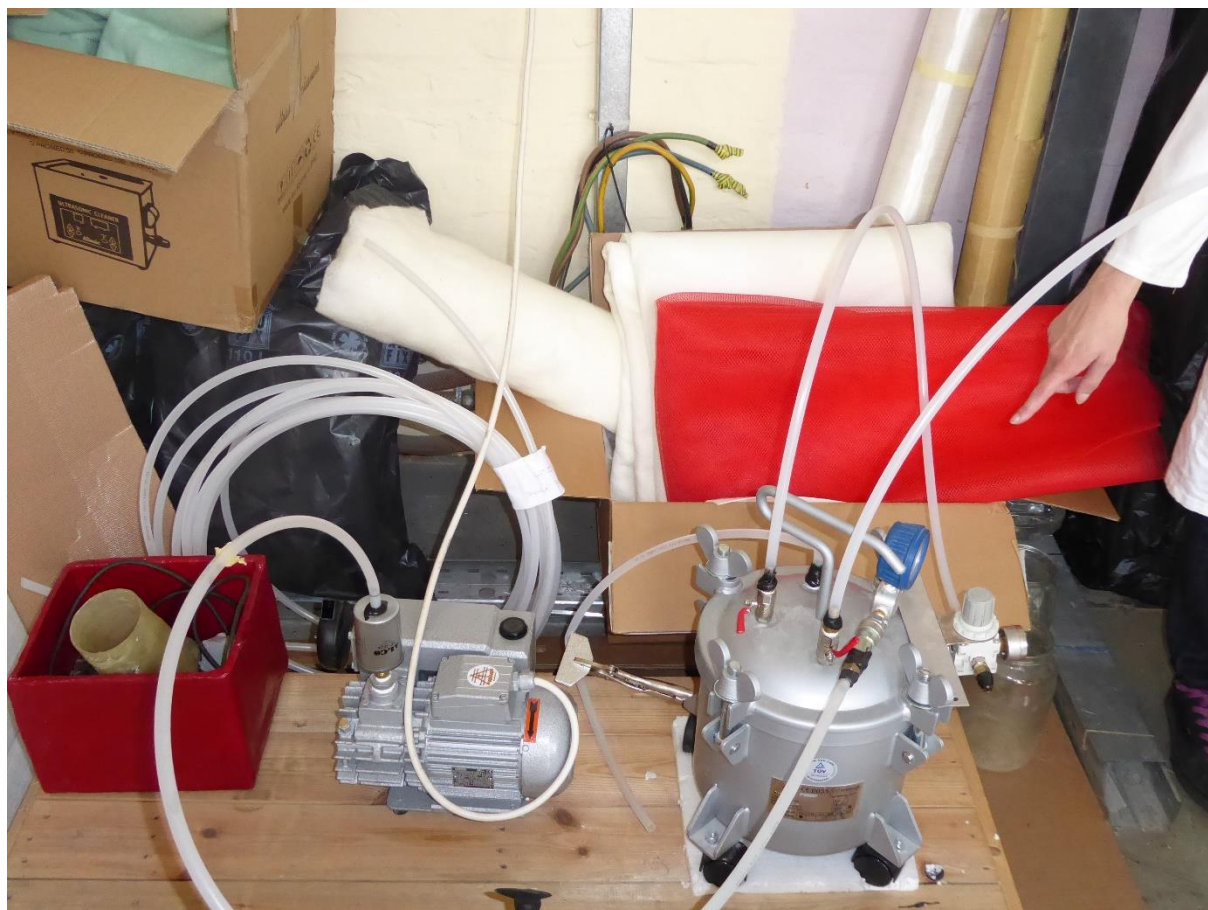
Završna faza proizvodnje je postavljanje folije koja će hermetički zatvoriti kalup kao što je prikazano slikom 7.10.





**Slika 7.10. Hermetički zatvoren kalup pomoću folije od poliamida**

Nakon toga slijedi uključivanje pumpe koja će istisnuti sav zrak iz kompozitne ploče, na taj način se dobiva kvalitetna izrada ploče, jer kako se istiskuje zrak, tako se smanjuju uključine zraka koje daju nepovoljna svojstva gotovog kompozita. Time se istiskuje i višak smole koji će upiti tkanina za upijanje (e. *breather*). Prilikom istiskivanja zraka postoji mogućnost da pumpa povuče udio smole. Ukoliko smola dođe do ventila, ventil je uništen te ukoliko smola dođe do pumpe ona će također biti uništena. Zato je potrebno staviti ventil dalje od izratka pa će samim time i vjerojatnost za oštećenje ventila biti manja. Prije nego što povučeni zrak kroz ventil ide do pumpe, on prolazi kroz spremnik koji služi kao zaštita ukoliko višak smole krene od ventila prema pumpi. Ukoliko se desi da višak smole krene od ventila prema pumpi on će ostati filtriran u zaštitnom spremniku koji će doduše nakon toga biti uništen, ali tome i služi. Trošak zamijene pumpe je skuplji nego li bilo koji drugi dio. Slikom 7.11 prikazana je pumpa, zaštitni spremnik te potrebne cijevi kroz koje struji zrak.



**Slika 7.11. Podtlačna pumpa sa zaštitnim spremnikom**

Kad podtlačna pumpa izvuče sav zrak i epoksidna smola ne počinje gelirati, preporučuje se da vakuum pumpa cijelo vrijeme radi. Budući da je vrijeme umreživanja upotrebene matrice cca 40 min, u tom slučaju je poželjno da pumpa radi do kraja umreživanja. Kompozitna ploča je dobila svoj završni izgled koji je prikazan slikom 7.12 nakon umreživanja od 24 sata.





**Slika 7.12. Gotova kompozitna ploča**

Nakon što je izrađena kompozitna ploča, potrebno je izrezati ispitna tijela u skladu s propisanim normama što je opisano u poglavlju 6.3. Izrezana ispitna tijela prikazana su slikom 7.13.



**Slika 7.13. Izrezana ispitna tijela za određivanje mehaničkih svojstava**



## 8. REZULTATI ISPITIVANJA MEHANIČKIH SVOJSTAVA

U nastavku će biti dan prikaz rezultata ispitivanja žilavosti, savojnih i rasteznih svojstava prema jednadžbama opisanim u poglavlju 6.

### 8.1 Ispitivanje žilavosti

U tablici 8.1 prikazane su vrijednosti udarne žilavosti i apsorbirane energije prema ispitnim uzorcima.

**Tablica 8.1. Rezultati ispitivanja žilavosti**

Ispitno tijelo	$h$ [mm]	$b$ [mm]	$E_C$ [J]	$a_{cU}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
1	3,077	10,3	5	157,78
2	3,167	10,7	5,5	162,32
3	3,133	10	6	191,49
4	3,133	10	6	191,49
5	3,033	9,967	5	165,39
$\bar{x}$	3,1086	10,1934	5,5	173,694
S	0,053186	0,313875	0,5	16,4694787

Iz tablice 8.1 se vidi da je srednja dobivena vrijednost žilavosti po *Charpyu*  $a_{cU} = 173,694 \text{ kJ/m}^2$

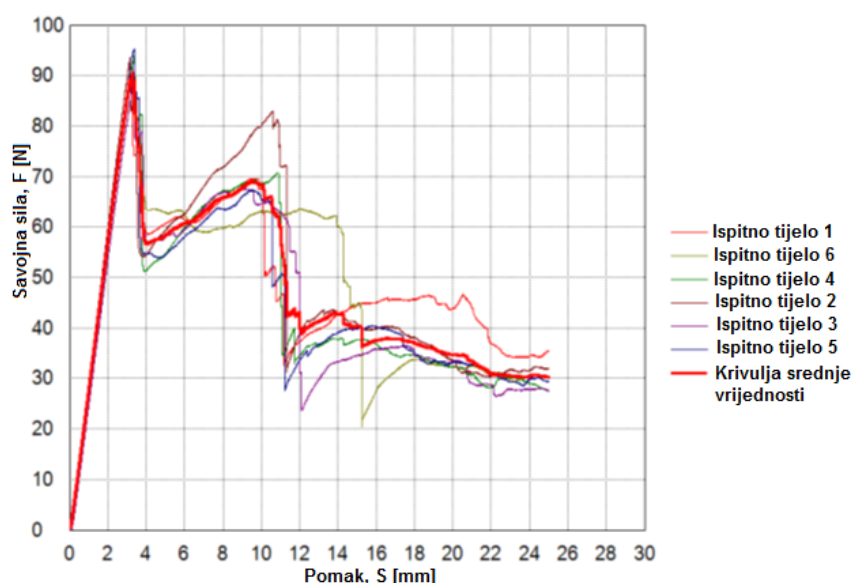
### 8.2 Ispitivanje savojnih svojstava

Tablicom 8.2 prikazane su vrijednosti dobivene ispitivanjem savojnih svojstava.

**Tablica 8.2. Rezultati savojnog ispitivanja**

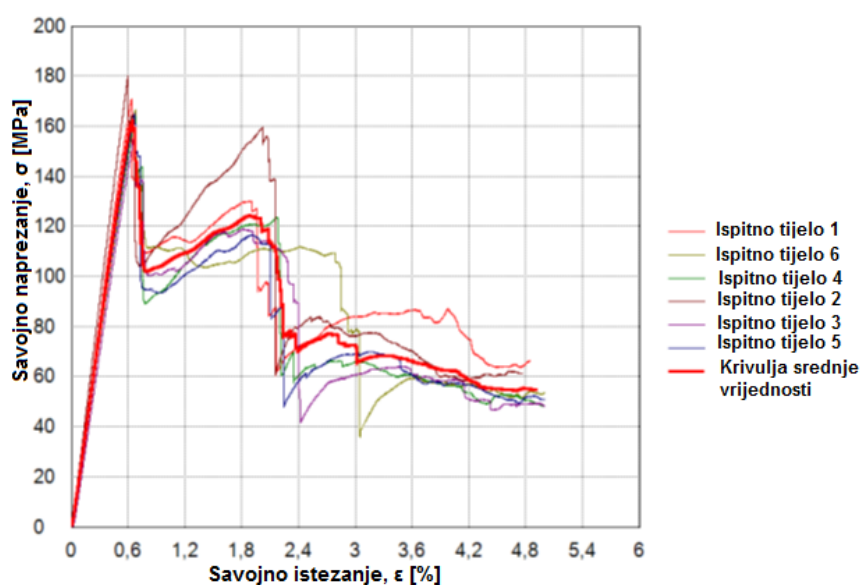
Ispitno tijelo	$h$ [mm]	$b$ [mm]	$F_{max}$ [N]	$\sigma_{fm}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_f$ [MPa]	$S$ [mm]
1	2,067	15,033	91,46	170,87	28355	3,29
2	2,033	15,1	93,56	179,9	30819,3	3,14
3	2,133	15	89,81	157,92	25495	3,38
4	2,133	15,1	93,87	163,98	25907,1	3,38
5	2,133	15,233	95,26	164,95	25599,8	3,38
6	2,033	15,1	94,78	166,67	25727,1	3,4
$\bar{x}$	2,088667	15,09433	93,1233333	167,3817	26983,88	3,328333
S	0,050127	0,079982	2,08820178	7,434932	2166,186	0,100083

Prema čemu su u crtane vrijednosti u dijagram sila-pomak prikazane slikom 8.1.



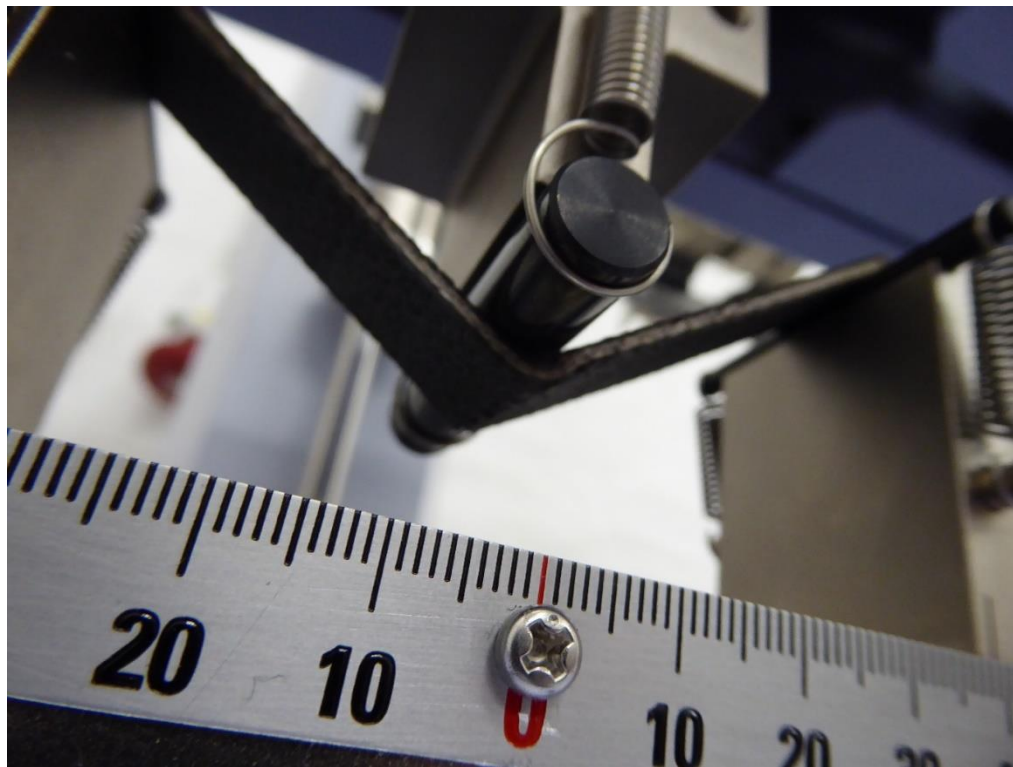
**Slika 8.1. Dijagram sila – pomak kod ispitivanja savojnih svojstava**

Prema konstrukciji linija iz dijagrama vidljivo je kako je ponovljivost rezultata dobra, krivulje imaju sličan oblik (konturu) što je na neki način garancija za dobro provedeno ispitivanje. Crvenom linijom je prikazana srednja vrijednost, te je iz nje vidljivo kako se poklapa s ostalim linijama. U tablici 8.2 vidi se da je srednja vrijednost savojne čvrstoće  $\sigma_{fm} = 167,3817 \text{ N/mm}^2$ . Slikom 8.2 prikazan je dijagram savojnog naprezanja – istezanja.



**Slika 8.2. Dijagram savojnog naprezanja - istezanja**

Na slici 8.3 prikazano je puknuće sloja ugljikovih vlakana na ispitnom tijelu prilikom ispitivanja savojne čvrstoće.



Slika 8.3. Puknuće ispitnog tijela prilikom savojnog ispitivanja

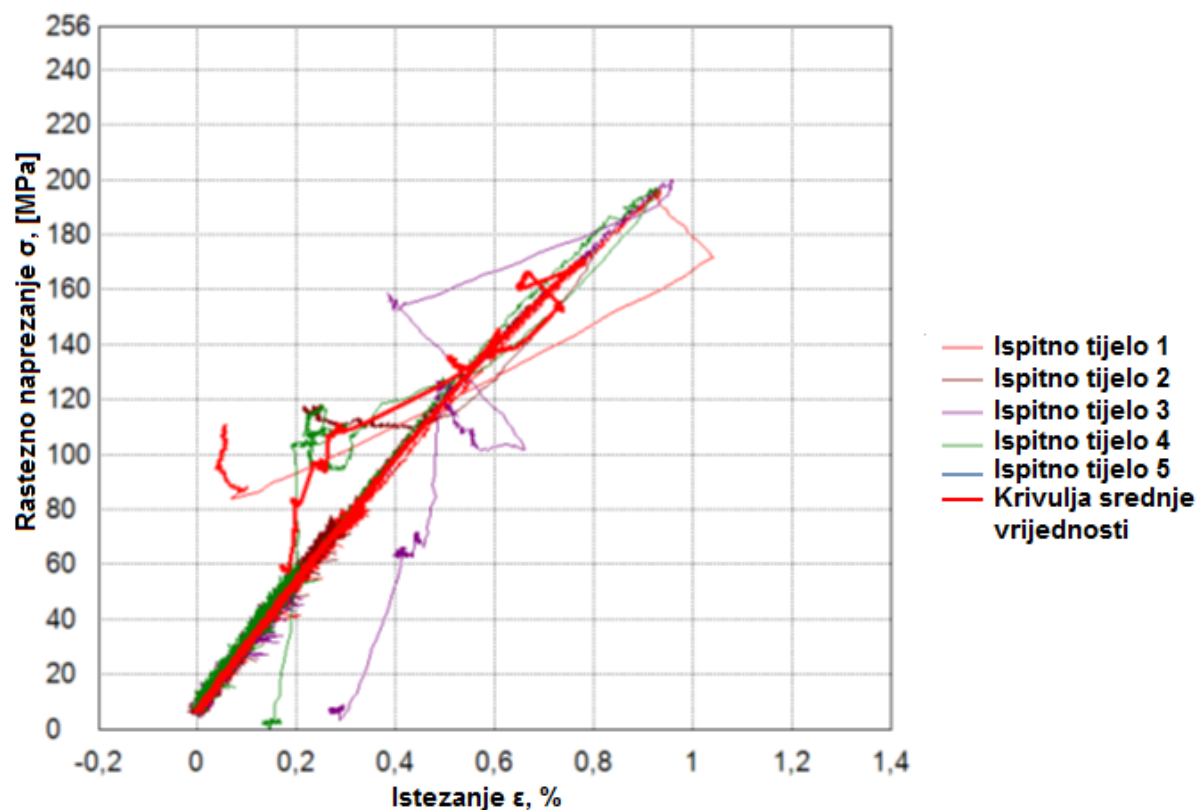
### 8.3 Ispitivanje rasteznih svojstava

Tablicom 8.4 prikazane su vrijednosti dobivene ispitivanjem rastezne čvrstoće. Srednja vrijednost rastezne čvrstoće  $R_m = 193,593$  MPa.

Tablica 8.3. Rezultati rasteznog ispitivanja

Ispitno tijelo	$h$	$b$	$F_{max}$ [N]	$R_m$ [MPa]	$E$ [MPa]
1	2,000	25,133	10809,4	196,53	22166,9
2	2,100	25,033	9187,5	175	23903,7
3	2,033	25,067	10453,1	199,907	22648,1
4	2,100	25,067	10584,4	196,92	23310,9
5	2,033	24,967	10771,9	199,61	22581,9
$\bar{x}$	2,053	25,053	10361,260	193,593	22922,300
S	0,044721	0,060553	671,824615	10,50554	684,8071

Pri čemu su vrijednosti ucrtane u dijagram naprezanja-istezanja (slika 8.3).



Slika 8.4. Dijagram rastezno naprezanje – istezanje

Iz prikazanog dijagrama je vidljivo kako su konture prikazanih linija svojstvenih svakom ispitnom tijelu slične, ponovljivost mjerenja je dobra, što znači da je ispitivanje dobro provedeno. U ovome dijagramu je prikazana i prosječna linija dobivenih svojstava. Naprezanje je puno teže podnio ugljikov sloj vlakana koji se zatim počeo raslojavati što je uzrokovalo raslojavanje i ostalih dijelova ispitnog tijela (slika 8.4).



**Slika 8.5. Raslojavanje ispitnog tijela**

## 9. RASPRAVA REZULTATA

Nakon što su provedena potrebna ispitivanja koja su smatrana važnima za primjenu ispitnog materijala za proizvodnju odbojnika automobila, preostaje rasprava rezultata i usporedba s postojećim materijalima koji se upotrebljavaju za izradu odbojnika.

Za izradu odbojnika u novije vrijeme upotrebljava se čelik pod nazivom *Usibor 1500*. To je čelik legiran borom i manganom te toplinski tretiran kako bi se poboljšala svojstva (tablica 9.1) [96, 107].

**Tablica 9.1. Svojstva čelika legiranog borom [96]**

Svojstvo	Maksimalna sila	Rastezna čvrstoća	Gustoća
	10000 N	1500 N/mm <sup>2</sup>	7800 kg/m <sup>3</sup>

Uspoređivajući svojstva materijala koji je ispitan sa svojstvima čelika koji se upotrebljava u iste svrhe je pomalo razočaravajući, ali potrebno je napomenuti kako su svojstva čelika prikazanog tablicom 9.1 dodatno bolja zbog toga što je ispitno tijelo izvedeno tj deformirano u obliku profila koji se upotrebljava za izradu odbojnika automobila. Prikaz profila u obliku "šešira" (*e. hat profile*) dan je slikom 9.1.



**Slika 9.1. Profil u obliku šešira za izradu odbojnika (*e. hat profile*) [108]**

Za daljnja ispitivanja predlaže se upotreba drukčijih vrsta tkanja ojačavala, te izvedeni oblik tj. konstrukciju ispitnih tijela u obliku profila prikazanog slikom 9.1 ili nekih drugih profila, kako bi se postigla željena relacija svojstava s obzirom na oblik kompozitnog materijala za određenu primjenu. S obzirom na dobivena svojstva ispitnih tijela, dolazi

se do zaključka kako bi navedeni proizvodni postupak te upotrebljavana matrica u kombinaciji s upotrebljavanim ojačalom veću primjenu pronašli u interijeru automobila ili eksterijeru automobila kao ukrasni elementi ili poklopci odbojnika. Za nosive elemente automobila i ostale dijelove koji su od krucijalne važnosti za sigurnost putnika potrebno je upotrebljavati drugi proizvodni postupak ili drugu kombinaciju vlakana kao što je već napisano. Samim time dolazimo do eksponencijalnog broja opcija kako bi se željena svojstva mogla poboljšati, no neosporiv adut polimernih kompozita, koji nikad neće biti nadmašen je mala gustoća materijala koja uzrokuje malu masu elemenata, što je u novije vrijeme itekako bitno.

## **10.ZAKLJUČAK**

Kompozitni materijali i pripadajući postupci proizvodnje kompozita su u razvoju. Proizvodnja kompozita više nije ograničena na proizvodnju skupih materijala izvrsnih svojstava. Neki od postupaka su prilagođeni masovnoj proizvodnji, no neki su ipak prilagođeni za manje serije ili čak za izradu prototipova. Cilj diplomskog rada bio je ukazati na rasprostranjenost polimernih kompozita te prikazati aspekte upotrebe. Neka tehnička rješenja i izvedbe proizvoda tj. komponenata bila bi puno skuplja i upitne kvalitete da nema polimernih kompozita. Upotrebom polimernih kompozita ostvarene su karakteristike kakve su u prošlosti bile nezamislive. S obzirom na asortiman primjene, polimerni kompoziti su područje sadašnjosti, a s obzirom na trendove, čeka ih svjetla budućnost.



## 11. LITERATURA

- [1] Filetin, T., Marić G.: Napredne tehnologije materijala
- [2] Plastic Composites: Combination of two constituents  
<http://training.pluscomposites.eu/courses/components>, 20.6.2015.
- [3] Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2002.
- [4] Šerčer, M., Pilipović, A.: Proizvodnja kompozitnih tvorevina, predavanja 2014./2015. FSB
- [5] CELC European Scientific Committee: Flax and Hemp fibres: a natural solution for the composite industry, 2012.
- [6] Reinforced types,  
<http://www.rapra.net/composites/materialselection/reinforcement-types.asp>, 20.6.2015.
- [7] Glass fibre/fiber, <http://www.netcomposites.com/guide/glass-fibrefiber/32>
- [8] <http://elleymaterial.com/High-strength-S-glass-fiber-fabric-41.htm>, 21.6.2015.
- [9] Staklena vlakna, <http://kompozit-kemija.hr/portfolio-posts/staklena-vlakna>, 21.6.2015.
- [10] [http://www.hitex-composite.com/pd\\_19177\\_fiberglass-composite-mat.htm](http://www.hitex-composite.com/pd_19177_fiberglass-composite-mat.htm), 21.6.2015.
- [11] Ugljična vlakna, <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=62994>, 26.6.2015.
- [12] Fiber reinforced composites, <http://altairenlighten.com/2012/06/thermosets/>, 26.6.2015.
- [13] Better, Stronger and Safer with Kevlar® Fiber,  
<http://www.dupont.com/productsand-services/fabrics-fibers-nonwovens/fibers/brands/kevlar.html>, 26.6.2015.
- [14] Magdalenić Bujanić, J.: Aramidna vlakna
- [15] Aramid fiber fabric, [http://img.nauticexpo.com/images\\_ne/photo-g/aramid-fiber-fabric-27794-293969.jpg](http://img.nauticexpo.com/images_ne/photo-g/aramid-fiber-fabric-27794-293969.jpg), 26.6.2015.
- [16] Zah, R., Hischier, R., Leao, A.L., Braun, I.: Curaua fibers in the automobile industry, Journal of Cleaner Production, 15 (2007), 1032-1040
- [17] Curaua fibers, <http://www.dicyt.com/viewItem.php?itemId=25380>, 27.6.2015.

- [18] Hemp fibers, <http://www.baltic-flax.com/wp-content/uploads/2010/12/long-flaxfibres2.jpg>, 27.6.2015.
- [19] Cannabis hemp, [http://thetruthaboutcannabis.com/?page\\_id=44](http://thetruthaboutcannabis.com/?page_id=44), 28.6.2015.
- [20] WoodForce tackles glass as plastic reinforcement  
<http://www.plasticstoday.com/articles/woodforce-tackels-glass-plastic-reinforcement1108201203>, 28.6.2015.
- [21] Schut, J. H.: Wood is good for compounding, sheet & profile,  
<http://www.ptonline.com/articles/wood-is-good-for-compounding-sheet-profile>,  
28.6.2015.
- [22] Polimeri, [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1337197700-0-mat\\_2\\_2012\\_treci\\_dio.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1337197700-0-mat_2_2012_treci_dio.pdf), 28.6.2015.
- [23] Akovali, G.: Handbook of Composite Fabrication, RAPRA Technology LTD., Shawbury, Shrewsbury, Shropshire, UK, 2001
- [24] Polyurethane – based matrix resin for the RTM process,  
<http://www.plastics.gl/automotive/polyurethane-based-matrix-resin-for-the-rtm-process/>, 1.7.2015,
- [25] PU composite spray moulding for automotive applications,  
<http://www.plastics.gl/automotive/high-pressure-lightens-the-load>, 1.7.2015.
- [26] Automotive Innovation Awards: Process/Assembly/Enabling Technologies,  
<http://www.plastics.gl/automotive/43rd-automotive-innovation-awardsprocessassemblyenabling-technologies/>, 1.7.2015.
- [27] 43rd Automotive Innovation Awards: Electrical Systems,  
<http://www.plastics.gl/automotive/43rd-automotive-innovation-awards-electricalsystems/>, 1.7.2015.
- [28] Perspectives for plastic, <http://www.plastics.gl/automotive/perspectives-for-plastics>, 1.7.2015.
- [29] Thermally conductive fibre reinforces composite material,  
<http://www.plastics.gl/exhibit/heat-onto-the-right-track-2>, 1.7.2015.
- [30] RTM300, thermoplastics, <http://www.plastics.gl/processing-misc/a-thermoplastic-that-behaves-like-a-thermoset-2/>, 1.7.2015.
- [31] A thermoplastic that behaves like a thermoset,  
<http://www.plastics.gl/automotive/lighter-and-lighter>, 1.7.2015.

- [32] Using CFRP in automotive: the 580g door,  
<http://www.plastics.gl/automotive/the580g-door/>, 1.7.2015.
- [33] Plastics in Automotive Engineering 2014,  
<http://www.plastics.gl/automotive/plasticsin-automotive-engineering-2014-2/>,  
1.7.2015.
- [34] Strong as steel: injection mouldable thermoplastic composites,  
<http://www.plastics.gl/injection-moulding/the-strongest-line-of-injection-mouldablethermoplastic-composites-available/>, 1.7.2015.
- [35] Fast epoxy resin for composite parts in mass production,  
<http://www.plastics.gl/automotive/fast-epoxy-resin-for-composite-parts-in-massproduction/>, 1.7.2015.
- [36] Plastic brake pedal for volume production,  
<http://www.plastics.gl/automotive/lightand-life-critical-2/>, 1.7.2015.
- [37] Filetin, T.: Pregled razvoja i primjene suvremenih materijala, Zagreb, lipanj, 2000.
- [38] <https://www.colourbox.com/preview/5770046-milky-latex-extracted-from-rubber-tree-hevea-brasiliensis-as-a-source-of-natural-rubber.jpg>, 3.7.2015.
- [39] <http://www.madehow.com/Volume-1/Tire.html>, 3.7.2015.
- [40] The Composition of a Tyre: Typical Components  
<http://www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/2%20-%20Composition%20of%20a%20Tyre%20-%20May%202006.pdf> , 3.7.2015.
- [41] Španiček, Đ.: Poliamidi, Polimeri, 34(2013)4
- [42] Polyamide – Nylon 6, 6-30% Glass Fiber Reinforced (PA 6, 6 30% GFR)  
<http://www.goodfellow.com/A/Polyamide-Nylon-6-6-30-Glass-Fiber-ReinforcedPolymer.html>, 3.7.2015.
- [43] Audi A8 spare wheel recess employs reinforced polyamide,  
<http://www.reinforcedplastics.com/view/8165/audi-a8-spare-wheel-recess-employsreinforced-polyamide/>, 3.7.2015.
- [44] Polyamide - Nylon - PA Carbon Fibre Reinforced,  
<http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=450>, 3.7.2015.
- [45] Transfer Case Motor Gear - Nylon with Carbon Fiber Reinforcement,  
[http://www.bmwpartsweb.com/Part-Number/ProductDetail\\_553509010\\_ODO\\_26B0A103.aspx](http://www.bmwpartsweb.com/Part-Number/ProductDetail_553509010_ODO_26B0A103.aspx), 3.7.2015.

- [46] Etcheverry, M., Barbosa, M., S.E.: Glass Fiber Reinforced Polypropylene Mechanical Properties Enhancement, Adhesion Improvement, [www.mdpi.com/19961944/5/6/1084/pdf](http://www.mdpi.com/19961944/5/6/1084/pdf) 3.7.2015.
- [47] Review on natural fiber reinforcement polymer Composites, U.S.Bongarde, V.D.Shinde P.G. Ichalkaranji (Kolhapur), Maharashtra, India
- [48] Where are natural fiber composites used in automobiles, <http://www.naturalfibersforautomotive.com/wp-content/uploads/2013/02/Car-Door.jpg> 3.7.2015.
- [49] A guide to polycarbonate in general, [http://www.ptslc.com/intro/polycarb\\_intro.aspx](http://www.ptslc.com/intro/polycarb_intro.aspx), 3.7.2015.
- [50] Noryl / PPO (Polyphenylene Oxide, modified), <http://www.scrapmonster.com/plastic/finish/noryl--ppo-polyphenylene-oxidemodified/high-performance-plastics/43>, 3.7.2015.
- [51] Smojver, I.: Mehanika kompozitnih materijala, [http://aerodamagelab.fsb.hr/books/materijali\\_mehanika\\_kompozita.pdf](http://aerodamagelab.fsb.hr/books/materijali_mehanika_kompozita.pdf), 3.7.2015.
- [52] Polyphenylene sulphide glass fiber reinforced, <http://www.goodfellow.com/E/Polyphenylenesulphide-40-Glass-Fibre-Reinforced.html>, 3.7.2015.
- [53] Carbon, glass fiber reinforced PEEK, [http://www.drakeresearch.com/page/Carbon\\_Glass\\_Fiber\\_Reinforced\\_PEEK](http://www.drakeresearch.com/page/Carbon_Glass_Fiber_Reinforced_PEEK), 3.7.2015.
- [54] Polyethylene Terephthalate - PET Glass Fibre Reinforced, <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=789>, 3.7.2015.
- [55] Automotive Innovation Trend-setting technologies garner SPE awards, <http://www.ptonline.com/articles/automotive-innovation-trend-setting-technologiesgarner-spe-awards>, 3.7.2015.
- [56] Polyetherimide; glass fiber reinforced, [http://www.efunda.com/glossary/materials/polymers/po30pct\\_glass\\_fiber\\_reinforced--334.cfm](http://www.efunda.com/glossary/materials/polymers/po30pct_glass_fiber_reinforced--334.cfm), 3.7.2015.
- [57] Fiber Reinforced Polyester Composites, Salar Bagherpour, NajafabadBranch, Iran, <http://www.intechopen.com/books/polyester/fibre-reinforced-polyestercomposites#SEC30>, 3.7.2015.
- [58] How are Pultursion Composites Manufactured?,

<http://www.pultrusionindustry.org/pultrusion-101/>, 3.7.2015.

[59] Glossary of Laminating Methods,

[http://www.ancor.com/glossary\\_laminating\\_methods.htm](http://www.ancor.com/glossary_laminating_methods.htm), 3.7.2015.

[60] RS Chop Gun, <http://www.graco.com/hr/hr/products/composites/rs-chop-gun.html>, 3.7.2015.

[61] Filament winding,

[http://www.nuplex.com/Composites/NuplexComposites/media/Composites-ImageLibrary/Images%20-%20Processes/Process\\_filamentwinding.jpg](http://www.nuplex.com/Composites/NuplexComposites/media/Composites-ImageLibrary/Images%20-%20Processes/Process_filamentwinding.jpg), 4.7.2015

[62] Composite propshafts, <http://www.ctgltd.com/product/aftermarket-propshafts>, 4.7.2015

[63] Handy Lay-up,

<http://4.bp.blogspot.com/4LK1zd6ZNR8/UBjvILPZeqI/AAAAAAAAHLQ/drEA2589RJo/s1600/hand+lay-upreduced.jpg>, 4.7.2015

[64] How tires are made, [http://www.goodyear.eu/uk\\_en/all-about-tires/understand-yourtire/how-tires-are-made/index.jsp](http://www.goodyear.eu/uk_en/all-about-tires/understand-yourtire/how-tires-are-made/index.jsp), 4.7.2015

[65] <http://www.mobiusenviro.com/tire-technologies-pyrolysis-retreading/scrap-tyre-remanufacturing>, 4.7.2015

[66] Polymer manufacturers develop novel solutions for the auto industry,

<http://www.icis.com/resources/news/2010/04/26/9352335/polymer-manufacturersdevelop-novel-solutions-for-the-auto-industry/>

4.7.2015

[67] Plastics and Polymer Composites roadmap for Automotive Markets, American Chemistry Council, 2014., 4.7.2015

[68] Lexus LFA, <http://www.lexus-int.com/models/LFA/tech-features-01.html>, 4.7.2015

[69] Schmitt, B.: The Making Of The Lexus LFA Supercar: Who, What, Where And Most Of All Why. An Inside The Industry Report, Chapter 1: From A Bar To Bar None,

[70] Audi media services, Audi R8,

[https://www.audimediaservices.com/publish/ms/content/en/public/pressemitteilungen/2013/09/10/Audi\\_R8\\_Coupe\\_and\\_R8\\_Spyder.html](https://www.audimediaservices.com/publish/ms/content/en/public/pressemitteilungen/2013/09/10/Audi_R8_Coupe_and_R8_Spyder.html), 4.7.2015.

[71] Audi R8 chassis,

[http://www.blogcdn.com/www.autoblog.com/media/2006/09/w8\\_cutaway26.jpg](http://www.blogcdn.com/www.autoblog.com/media/2006/09/w8_cutaway26.jpg),

4.7.2015

[72] Automotive Innovation Awards: Process/Assembly/Enabling Technologies,  
<http://www.plastics.gl/automotive/43rd-automotive-innovation-awardsprocessassemblyenabling-technologies/>,

5.7.2015.

[73] Carbon Fiber: The Secret of the 2014 Corvette Stingray,  
<http://mashable.com/2013/01/18/carbon-fiber-2014-corvette/>, 5.7.2015.

[74] Polymotive polymers and e-mobility in the automotive industry, 10(2012), 23.

[75] Ford Focus Carbon Fibre Prototype, <http://performancedrive.com.au/ford-focuspreviews-carbon-fibre-technology-to-be-used-on-future-vehicles-1011/ford-focuscarbon-fibre-prototype-2/>, 5.7.2015.

[76] Davies, G.: Materials for automobile bodies, 2003.

[77] Polymotive polymers in the automotive industry, 3(2010)22.  
<http://www.thetruthaboutcars.com/2012/07/the-making-of-the-lexus-lfa-supercar-whowhat-where-and-most-of-all-why-an-inside-report-chapter-1-from-a-bar-to-bar-none/>, 5.7.2015.

[78] Ferrari 430 16M Scuderia Spyder,  
<http://www.naplesmotorsports.com/vehicledetails/d2cc8af4b04cc14d8bfb418931034c13/2009+ferrari+430+16m+scuderia+spider+2-door+convertible.html?Framed=>, 5.7.2015.

[79] Brosius, D.: Brosius Management Consulting, Carbon fiber: the automotive material of twenty-first century

[80] Up-Close and Personal with the Mercedes SLS AMG,  
<http://www.imaginelifestyles.com/luxuryliving/2011/02/close-and-personal-mercedes-slsamg>, 5.7.2015.

[81] Composite Car Seat Shell Saves 45% Weight,  
<http://altairenlighten.com/2013/10/composite-car-seat-shell-saves-45-percent-weight/>, 5.7.2015.

[82] Alcantara (material), [http://en.wikipedia.org/wiki/Alcantara\\_\(material\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Alcantara_(material)), 5.7.2015.

[83] Jansen K.: Audi bringing fiber reinforced plastic springs to production models,  
<http://www.plasticsnews.com/article/20140701/NEWS/140709990/audi-bringing-fiberreinforced-plastic-springs-to-production-models>, 5.7.2015.

[84] Composite leaf springs: Saving weight in production suspension systems,

<http://www.compositesworld.com/articles/composite-leaf-springs-saving-weight-inproduction-suspension-systems>, 5.7.2015.

[85] Bridgestone targets fleets at IAA Commercial Vehicles 2014,

<http://www.bridgestonenewsroom.eu/stories/8618>, 5.7.2015.

[86] Carbon Fiber, Advanced Composite Explained,

<http://www.carbonlinewheels.com/materials.html>, 5.7.2015.

[87] World's first thermoplastic carbon composite wheel,

<http://www.plastics.gl/automotive/worlds-first-thermoplastic-carbon-composite-wheel/>, 5.7.2015.

[88] Koenigsegg Agera R, [http://www.m5board.com/vbulletin/koenigsegg-](http://www.m5board.com/vbulletin/koenigsegg-forumkoenigseggboard-com/201838-2012-koenigsegg-agera-r-wheels-picture-gtboard-comexclusive.html)

[forumkoenigseggboard-com/201838-2012-koenigsegg-agera-r-wheels-picture-gtboard-comexclusive.html](http://www.m5board.com/vbulletin/koenigsegg-forumkoenigseggboard-com/201838-2012-koenigsegg-agera-r-wheels-picture-gtboard-comexclusive.html), 5.7.2015.

[89] Polymotive polymers in the automotive industry, 9(2012),16-24

[90] Audi 3,2 FSI engine,

<http://www.weblogsinc.com/common/images/3060000000049284.JPG?0.3227868157259187>, 5.7.2015.

[91] Volkswagen switches to polypropylene composite for air intake manifolds,

<http://www.reinforcedplastics.com/view/11141/volkswagen-switches-to-polypropylenecomposite-for-air-intake-manifolds/>, 5.7.2015.

[92] Inovacije i razvoj tehnologije, 22(2013)1, 74-76

[93] [http://dnevnik.hr/vijesti/hrvatska/broj-prometnih-nesreca-u-hrvatskoj-raste---](http://dnevnik.hr/vijesti/hrvatska/broj-prometnih-nesreca-u-hrvatskoj-raste---430110.html)  
[430110.html](http://dnevnik.hr/vijesti/hrvatska/broj-prometnih-nesreca-u-hrvatskoj-raste---430110.html)

[94] Kleisner V., Zemčik R.: Analysis of composite car bumper reinforcement, Applied and Computational Mechanics 3 (2009) 287-296

[95] Davoodi M. M., Sapuan S.M., Yunus R.: Conceptual design of a polymer composite automotive bumper energy absorber, Materials and Design 29 (2008) 1447 – 1452

[96] Prabhakaran S., Chinnarasu K., Senthil Kumar M.: Design and Fabrication of Composite Bumper for Light Passenger Vehicles, International Journal of Modern Engineering Research (IJMER), Issue.4, July-Aug. 2012 pp-2552-2556

[97] Pilipović, A.: Proizvodnja kompozitnih tvorevina, predavanja 2015/2016, FSB

[98] Plastics – Determination of Charpy impact properties ISO 179-1:2010(E)

[99] Plastika – Određivanje rastezni svojstava HRN EN ISO 527 4:2008

- [100] Fibre reinforced plastics – Determination of flexural properties HRN EN ISO 14125:1998; A1:2011
- [101] [https://plastics.ulprospector.com/properties/images/ISO179\\_f.gif](https://plastics.ulprospector.com/properties/images/ISO179_f.gif), 28.06.2016.
- [102] Shimadzu AG-IC 300 kN, <http://shim-pol.pl/pliki/produkty/Shimadzu/AG-IC.pdf>, 28.06.2016.
- [103] [https://fog.ccsf.edu/~wkaufmyn/ENGN45/ENGN45\\_Online\\_Homework/06\\_Homework\\_MechBehavior\\_SOLUTIONS\\_files/MOR.PNG](https://fog.ccsf.edu/~wkaufmyn/ENGN45/ENGN45_Online_Homework/06_Homework_MechBehavior_SOLUTIONS_files/MOR.PNG), 28.06.2016.
- [104] Shimadzu AGS-X <http://shim-pol.pl/pliki/produkty/Shimadzu/AGS-X.pdf>, 28.06.2016.
- [105] <http://www.rexco-usa.com/waxes-buffing-compound/>, 30.06.2016.
- [106] Hexion Laminierharz MGS L 285, [http://www.rg.de/w/images/8/8d/Td\\_de\\_L285\\_dt\\_071206.pdf](http://www.rg.de/w/images/8/8d/Td_de_L285_dt_071206.pdf), 30.06.2016.  
<http://www.autosteel.org/~media/Files/Autosteel/Programs/Bumpers/Steel%20Bumper%20Systems%205th%20Edition.pdf>, 01.07.2016.
- [107] Ultra high strength steels, <http://automotive.arcelormittal.com/europe/products/UHSS/Usibor/EN>, 02.07.2016.
- [108] Steel Market Development institute: Steel bumper systems for passenger vehicles,



## 12. PRILOZI

Tablica 12.1. Podaci o izmjeranim dimenzijama ispitnih tijela za ispitivanje žilavosti

Tablica 12.2. Podaci o izmjeranim dimenzijama ispitnih tijela za ispitivanje savojnih svojstava

Tablica 12.3. Podaci o izmjeranim dimenzijama ispitnih tijela za ispitivanje rasteznih svojstava

Radionički crtež 12.4. Nacrt ispitnog tijela za ispitivanje žilavosti

Radionički crtež 12.5. Nacrt ispitnog tijela za ispitivanje savojnih svojstava

Radionički crtež 12.6. Nacrt ispitnog tijela za ispitivanje rasteznih svojstava

**Tablica 12.1. Podaci o izmjeranim dimenzijama ispitnih tijela za ispitivanje žilavosti**

		Mjerni objekt: ispitno tijelo za ispitivanje žilavosti			
		Mjerena veličina	a	b	d
Ispitno tijelo 1	1. mjerenje	75,40	10,20	3,08	
	2. mjerenje	75,40	10,30	3,10	
	3. mjerenje	75,40	10,40	3,05	
	$\bar{x}$	75,400	10,300	3,077	
	S	0,000	0,100	0,025	
	Mjerena veličina	a	b	d	
Ispitno tijelo 2	1. mjerenje	75,40	10,70	3,10	
	2. mjerenje	75,40	10,70	3,20	
	3. mjerenje	75,50	10,70	3,20	
	$\bar{x}$	75,433	10,700	3,167	
	S	0,058	0,000	0,058	
	Mjerena veličina	a	b	d	
Ispitno tijelo 3	1. mjerenje	75,20	10,00	3,20	
	2. mjerenje	75,20	10,00	3,10	
	3. mjerenje	75,30	10,00	3,10	
	$\bar{x}$	75,233	10,000	3,133	
	S	0,058	0,000	0,058	
	Mjerena veličina	a	b	d	
Ispitno tijelo 4	1. mjerenje	75,00	9,90	3,10	
	2. mjerenje	75,10	10,00	3,20	
	3. mjerenje	75,00	10,10	3,10	
	$\bar{x}$	75,033	10,000	3,133	
	S	0,058	0,100	0,058	
	Mjerena veličina	a	b	d	
Ispitno tijelo 5	4. mjerenje	75,10	10,00	3,00	
	5. mjerenje	75,00	10,00	3,00	
	6. mjerenje	75,00	9,90	3,10	
	$\bar{x}$	75,033	9,967	3,033	
	S	0,058	0,058	0,058	

**Tablica 12.2. Podaci o izmjerenim dimenzijama ispitnih tijela za ispitivanje savojnih svojstava**

Mjerni objekt: ispitno tijelo za ispitivanje savojnih svojstava				
Ispitno tijelo 1	Mjerena veličina	a	b	d
	1. mjerenje	100,00	15,10	2,10
	2. mjerenje	100,10	15,00	2,00
	3. mjerenje	100,10	15,00	2,10
	$\bar{x}$	100,067	15,033	2,067
Ispitno tijelo 2	S	0,058	0,058	0,058
	Mjerena veličina	a	b	d
	1. mjerenje	100,00	15,10	2,10
	2. mjerenje	100,00	15,10	2,00
	3. mjerenje	100,00	15,10	2,00
Ispitno tijelo 3	$\bar{x}$	100,000	15,100	2,033
	S	0,000	0,000	0,058
	Mjerena veličina	a	b	d
	1. mjerenje	100,10	15,00	2,20
	2. mjerenje	100,10	15,00	2,10
Ispitno tijelo 4	3. mjerenje	100,10	15,00	2,10
	$\bar{x}$	100,100	15,000	2,133
	S	0,000	0,000	0,058
	Mjerena veličina	a	b	d
	1. mjerenje	100,00	15,10	2,10
Ispitno tijelo 5	2. mjerenje	100,10	15,10	2,20
	3. mjerenje	100,10	15,10	2,10
	$\bar{x}$	100,067	15,100	2,133
	S	0,058	0,000	0,058
	Mjerena veličina	a	b	d
Ispitno tijelo 6	4. mjerenje	100,20	15,20	2,10
	5. mjerenje	100,20	15,30	2,10
	6. mjerenje	100,30	15,20	2,20
	$\bar{x}$	100,233	15,233	2,133
	S	0,058	0,058	0,058

**Tablica 12.3. Podaci o izmjerenim dimenzijama ispitnih tijela za ispitivanje rasteznih svojstava**

Mjerni objekt: ispitno tijelo za ispitivanje rasteznih svojstava				
Ispitno tijelo 1	Mjerena veličina	L	b	h
	1. mjerenje	250,10	25,10	2,00
	2. mjerenje	250,00	25,20	2,00
	3. mjerenje	250,00	25,10	2,00
	$\bar{x}$	250,033	25,133	2,000
Ispitno tijelo 2	Mjerena veličina	L	b	h
	1. mjerenje	250,10	25,10	2,10
	2. mjerenje	250,10	25,00	2,10
	3. mjerenje	250,00	25,00	2,10
	$\bar{x}$	250,067	25,033	2,100
Ispitno tijelo 3	Mjerena veličina	L	b	h
	1. mjerenje	250,00	25,10	2,10
	2. mjerenje	250,00	25,10	2,00
	3. mjerenje	250,00	25,00	2,00
	$\bar{x}$	250,000	25,067	2,033
Ispitno tijelo 4	Mjerena veličina	L	b	h
	1. mjerenje	250,10	25,00	2,20
	2. mjerenje	250,20	25,10	2,10
	3. mjerenje	250,10	25,10	2,00
	$\bar{x}$	250,133	25,067	2,100
Ispitno tijelo 5	Mjerena veličina	L	b	h
	4. mjerenje	250,10	25,00	2,00
	5. mjerenje	250,00	24,90	2,00
	6. mjerenje	250,00	25,00	2,10
	$\bar{x}$	250,033	24,967	2,033
Ispitno tijelo 6	Mjerena veličina	L	b	h
	1. mjerenje	250,10	25,10	2,10
	2. mjerenje	250,10	25,10	2,10
	3. mjerenje	250,10	25,10	2,10
	$\bar{x}$	250,100	25,100	2,100